RELOJES BIOLOGICOS • VIAJES TRIPULADOS A MARTE • CINE Y ESPACIO



MAYO 2000
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EL OJO DEL HURACAN

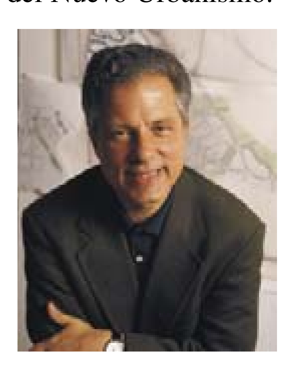
ENJAMBRES INTELIGENTES

00284
9 770210 136004

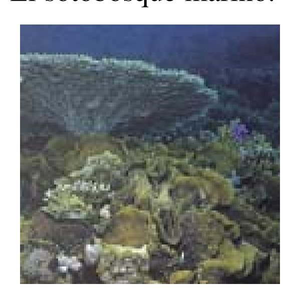


Mayo de 2000 Número 284

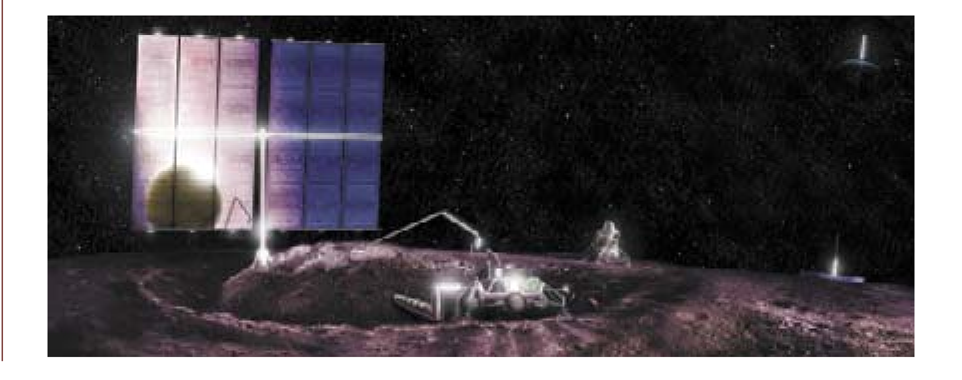
SECCIONES











SECCIONES



Portada: Dennis Kunkel/*Phototake*

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Cynthia Turner (*relojes*); Peter Murphy (*fotografías*)
8	Cynthia Turner
10	Juergen Berger, Instituto Max Planck/SPL/Photo Researchers Inc.
12-13	Cynthia Turner
14	Adaptado por *SEARCH*, primavera 1998
15	Cynthia Turner
16-17	James Gary
18	Bryan Christie (*arriba y abajo*); Simulación de *StarLogo*, cortesía de Mitch Resnick *MIT* Media Lab (*centro*)
19	Bryan Christie
20-21	Mark Moffett (*izquierda*); Laboratorio de Investigación en Robótica, Universidad de Alberta (*abajo centro y derecha*)
22	Eric Bonabeau y Guy Théraulaz
23	Paul A. Souders, *Corbis*
24-25	NOAA-Centro de Ciencia e Ingeniería Espacial adscrito a la Universidad de Wisconsin en Madison (*fotografía*); Bryan Christie (*composición gráfica*)
26-29	Andrew Itkoff
44-45	Pat Rawlings
46	NASA/JPL/Malin Space Science Systems
47	Mola Science Team (*arriba*); Reproducción con permiso de Smith *et. al.* ©1999 AAAS (*abajo*)
48	Edward Bell (*arriba*); Sarah L. Donelson (*abajo*)
49	Alfred T. Kamajian (*arriba*); Sarah L. Donelson (*abajo*)
50-51	Christoph Blumrich
52	Edward Bell
53	NASA
54	Don Foley
55	NASA/Laboratorio de Propulsión a Chorro
56-57	JPL/Caltech/NASA (*Marte*); SAIC, Pat Rawlings (*arriba*); Ian Worpole (*centro*); Robert Murray (*abajo*)
58	Ian Worpole
59	Don Dixon
60	B. E. Johnson
61	B. E. Johnson; Peter C. Thomas; Calvin Hamilton; A. Tayfun Oner
62-63	Don Dixon
64	Slim Films
65	NASA
66-67	Rob McEwan
69	Research Products Catalog
70	Cortesía de A. M. Merino
71-72	Carlos López Otín
73-74	Cortesía de X. Gomis-Rüth
75	Carlos López Otín
77-83	Ricardo Azoury
84-85	Daniels & Daniels
86-87	Bryan Christie
88	Dusan Petricic
96	George Retseck

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Esteban Santiago: *La cadencia del reloj biológico*; Luis Bou: *Enjambres inteligentes* y *Juegos matemáticos*; Manuel Puigcerver: *Anatomía de un huracán*; Mónica Murphy: *¿Para qué ir a Marte?*; Juan Pedro Adrados: *Cómo ir a Marte*; Angel Garcimartín: *A Marte Sin Escalas* y *Perfiles*; Juan P. Campos: *A Marte pasando por sus lunas*; Alfonso Susanna: *Las bromelias del bosque atlántico*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
ASSOCIATE EDITORS Timothy M. Beardsley y Gary Stix
ON-LINE EDITOR Kristin Leutwyler
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette
CONTRIBUTING EDITORS Graham P. Collins; Marguerite Holloway y Paul Wallich
PRODUCTION William Sherman
CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

BOMBA DE HIDRÓGENO Y DEMOCRACIA. «A propósito del secretísimo asunto de la bomba atómica: he aquí un arma sobre la que el ciudadano medio está tan mal informado, que cree que podrá salvar al país de un ataque. Ahíto de histeria por el terror rojo y exasperado por las mentiras políticas, el ciudadano medio se convence fácilmente de que puede hallar cierta seguridad y alivio de todo ello merced a la bomba de hidrógeno. Estas son las consecuencias de lo que puede ocurrir en una democracia cuando decisiones de transcendental importancia para el país se toman sin un examen público profundo de la información pertinente.»

VIDA MECÁNICA. «Otra rama de la evolución electromecánica la representan las pequeñas máquinas que hemos construido en Bristol. En vez de los 10.000 millones de células de nuestro cerebro, Elmer y Elsie contienen sólo dos órganos sensoriales, uno de visión y otro de tacto, más dos motores. Deliberadamente se limitó a dos el número de componentes al objeto de descubrir qué grado de complejidad de comportamiento podría lograrse con el mínimo número de elementos. La verdad es que Elmer y Elsie son impredecibles. Pese a su tosquedad, ofrecen una misteriosa impresión de determinación, independencia y espontaneidad.»

ANTIHISTAMINAS Y ACEITE DE VÍBORA. «Desde que el Departamento de Bromatología y Farmacología aprobó en septiembre pasado la venta libre de los antihistamínicos, éstos se han convertido en las medicinas más publicitadas y de venta más rápida en EE.UU. Se estima que los norteamericanos gastarán este año 100 millones de dólares en antihistamínicos para 'frenar los catarros'. Sin embargo, tras unos estudios cuidadosamente controlados la Asociación Médica Americana 'no cree que los datos demuestren que los antihistamínicos sean útiles para prevenir el resfriado común'. El mes pasado la Comisión Federal de Comercio hizo públicas quejas contra cuatro fabricantes de antihistaminas por publicidad 'falsa y engañosa'.»

...cien años

COMPROBANDO RAÍLES ELÉCTRICOS. «Presentamos una ilustración del comprobador de raíles de Lord Kelvin, que se emplea para determinar si hay defectos en la conductividad de los raíles de un sistema de trole con cable aéreo. Los raíles de guía realizan la importante función de transportar la corriente de retorno. La ilustración recoge el momento en que la barra de contacto del comprobador se aplica en una juntura de los raíles, por si detectara alguna unión defectuosa.»

TECNOLOGÍA ÚTIL. «El teléfono ha conseguido un gran éxito en el Oeste allí donde sus cables han llegado a casas de campo apartadas, pues les permite avisarse a tiempo de la presencia de vagabundos. Es también muy útil en casos de incendios y enfermedades.»

DESINTEGRACIÓN RADIACTIVA. «A tenor del principio de la conservación de la energía, parece imposible la emisión de radiación dotada de energía sin una pérdida de masa en la fuente emisora. Las mediciones de Henri Becquerel sobre la desviación de los rayos de radio en un campo eléctrico, tomadas combinadamente con las de monsieur y madame Curie sobre las cargas transportadas por los rayos, muestran una salida a esa dificultad, habida cuenta de la extrema pequeñez de las cantidades de energía. La energía radiada por centímetro cuadrado es del orden de una diez millonésima de watt por segundo. Por consiguiente, una pérdida de peso del radio aproximadamente de un miligramo en mil millones de años bastaría para explicar los efectos observados.»



Raíles con toma eléctrica: un comprobador concienzudo, 1900

...ciento cincuenta años

POMPA DE JABÓN CALIFORNIANA. «Las noticias que desde California nos traen los vapores no son halagüeñas. La cantidad de oro en polvo no alcanza las estimaciones que se hicieron y el precio actual en San Francisco muestra una baja rápida, lo que respalda la creencia de que ya ha comenzado una regresión. Va contra la naturaleza de las cosas pensar que semejante fiebre por California pudiera proseguir durante tanto espacio de tiempo, sin que resultaran unos reveses abrumadores. Parece que ha llegado la crisis. Muchos cosecharán pesares donde se evidenciaba prosperidad. Aquel San Francisco del otoño pasado ha muerto; aquella colmena atareada y bulliciosa ha dejado de trabajar.»

GRAN GUIÑOL POR SUSCRIPCIÓN. «El señor Gliddon, el viajero de Egipto, actualmente conferenciante en Boston y expositor de su Panorama del Nilo, ofrece abrir una de las momias de su colección si allega una suscripción suficiente. La momia es el cadáver de la hija de un alto sacerdote de Tebas que vivió hace más de tres mil años, aproximadamente en la época de Moisés. Su valor de mercado se cifra en 1500 dólares. Ya se han suscrito un buen número de nuestros ciudadanos más ricos e influyentes.»

La cadencia del reloj biológico

Los organismos se ajustan, en su mayoría, a ritmos cronométricos de 24 horas. La genética nos ha revelado parentescos entre los relojes moleculares de la mosca del vinagre, el ratón y el hombre

Michael W. Young



SAN FRANCISCO

Hay que hacer un auténtico esfuerzo para no quedarse dormido a las siete de la tarde. El apetito sentido a las quince desaparece a la hora de la cena. Nos despertamos a las cuatro de la madrugada, sin posibilidad de seguir dormidos. Son situaciones que conocen muy bien quienes viajan de Nueva York a San Francisco. En general, con motivo de unas vacaciones de una semana o por traslados de negocios, cuando el organismo se ha acostumbrado ya al nuevo horario es el momento de volver a casa y retomar la rutina.

En mi laboratorio, un grupo de moscas *Drosophila* viaja también de Nueva York a San Francisco, o al revés, aunque en vuelo simulado. En vez de terminales de aeropuerto hay sendas incubadoras, del tamaño de un frigorífico, donde se lee, en una, "Nueva York" y, en la otra, "San Francisco". Las luces de las incubadoras se encienden y se apagan en el momento en que sale o se pone el sol en esas ciudades. (Por razones de coherencia, hemos puesto el orto a las seis de la mañana y el ocaso a las seis de la tarde, en ambas urbes.) Y hemos fijado la temperatura de las incubadoras en 22 ºC.

Las moscas emprenden su viaje simulado en el interior de pequeños tubos de vidrio, ajustados dentro de bandejas que controlan sus movimientos con un haz de luz infrarroja. Cada vez que una mosca atraviesa el haz, proyecta una sombra en un fototransmisor, conectado a su vez a un ordenador que registra la actividad. El ir de Nueva York a San Francisco no implica ningún vuelo real de cinco horas para los insectos. Nos limitamos a desconectar la bandeja de una incubadora, la trasladamos a la otra y conectamos.

Nos servimos del argot transcontinental para identificar y estudiar las funciones de varios genes que parecen ser los engranajes del reloj biológico que controla los ciclos de día y noche en una gama amplia de organismos. Incluimos en éstos la mosca del vinagre, el ratón y el hombre. La identificación de tales genes nos permite determinar las proteínas que cifran, proteínas que podrían convertirse en diana del tratamiento de diversas afecciones, desde trastornos del sueño hasta depresiones estacionales.

El engranaje fundamental del reloj biológico se halla en el núcleo supraquiasmático (NSQ), un grupo de células nerviosas del hipotálamo. Cuando la luz estimula al amanecer la retina del ojo, ciertos nervios especializados envían señales al núcleo supraquiasmático,



1. EL SOMETIMIENTO de moscas del vinagre a un salto simulado de horario ayuda a entender las bases moleculares de los relojes biológicos de los organismos, incluido el hombre. Las moscas se mantienen en tubos de vidrio pequeños (*fotografía a la izquierda*) dispuestos en bandejas equipadas con sensores que registran la actividad de los insectos. (En la fotografía, Michael W. Young nos muestra una de éstas repleta de tubos.) Cuando una bandeja de una incubadora con la hora de Nueva York, donde es de noche a la 7:30 de la tarde, se traslada a otra incubadora que simula la hora de San Francisco, donde son las 4:30 y hay luz todavía, se registra una caída en picado de los niveles de proteínas clave del cerebro de los insectos.

EL RELOJ BIOLOGICO

CUESTIONES BASICAS

¿Dónde reside el reloj biológico? En los mamíferos el reloj principal que dicta la actividad del ciclo de día y noche, el ritmo circadiano, se halla en el núcleo supraquiasmático del cerebro. Pero hay células por todo el organismo que también presentan este tipo de actividad rítmica.

¿Qué es lo que dirige el reloj? En el interior de las células del núcleo supraquiasmático, hay genes rítmicos especializados que se activan o inactivan por las propias proteínas que determinan, en un bucle de realimentación que tiene una cadencia de 24 horas.

Por lo que concierne al reloj biológico del ciclo normal de 24 horas, ¿depende de la luz y la oscuridad? No. Los ritmos moleculares de la actividad de estos genes cronometradores son innatos y automantenidos. Persisten en ausencia de ciclos ambientales de día y noche.

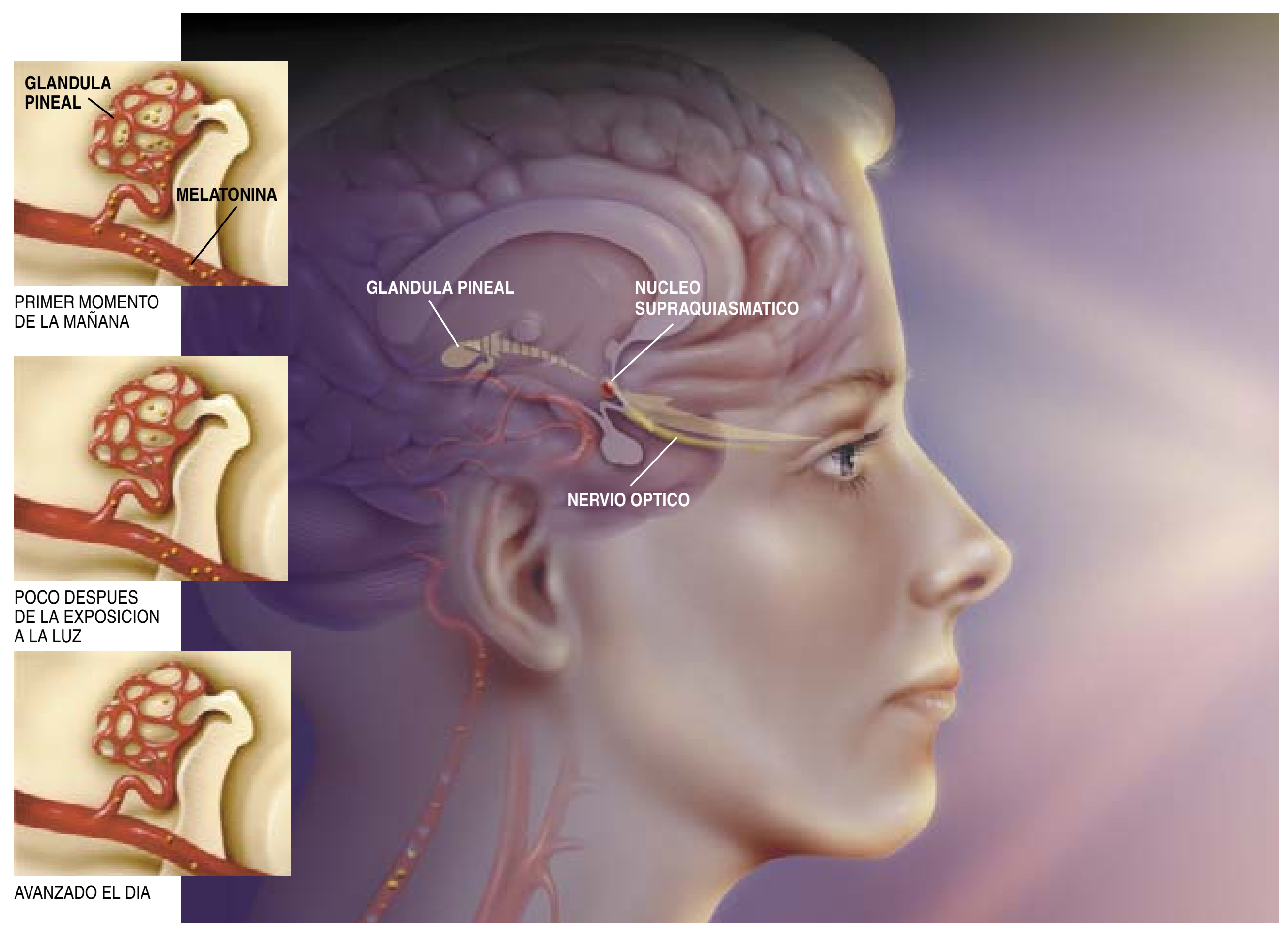
¿Qué papel desempeña la luz en la regulación y reajuste del reloj biológico? La luz brillante que absorbe la retina durante el día ayuda a sincronizar los ritmos de actividad de los genes cronometradores con el ciclo ambiental vigente. La exposición a una luz brillante durante la noche reajusta los ritmos circadianos cambiando rápidamente la cantidad de algunos productos de los genes vinculados con la función de reloj.

¿Cómo regula un reloj molecular la actividad día-noche de un individuo? Las proteínas fluctuantes sintetizadas por los genes cronometradores controlan vías genéticas adicionales que sincronizan el reloj molecular con cambios pautados de la fisiología y comportamiento.

que a su vez controla el ciclo de producción de numerosas sustancias dotadas de actividad biológica. El NSQ estimula la glándula pineal, una región cerebral vecina. Según las instrucciones del NSQ, esta glándula produce con determinada cadencia melatonina, la hormona del sueño. Con el avance del día, hasta el atardecer, la glándula pineal incrementa de forma gradual la síntesis de melatonina. Al subir los niveles sanguíneos de la hormona, se asiste a un descenso ligero de la temperatura corporal y a un aumento de la tendencia al sueño.

El reloj humano

La luz, así parece, pone en hora cada día el reloj biológico. No obstante, el ritmo circadiano, el cambio de día y noche, sigue funcionando incluso en ausencia de luz, prueba de que la actividad del NSQ es innata.



2. LA LUZ que incide en el ojo frena la síntesis de melatonina en la glándula pineal. Según parece, esa hormona (*recuadros*) interviene en la inducción del sueño. La señal para reducir la secreción de melatonina se transmite desde la retina, vía nervio óptico, al núcleo supraquiasmático (NSQ). La conexión del NSQ con la glándula pineal es indirecta.

MICHAEL W. YOUNG dirige el laboratorio de genética de la Universidad de Rockefeller. Preside también la unidad Rockefeller de la Fundación Nacional de la Ciencia y el Centro de Ajuste y Coordinación Temporal Biológico, un consorcio investigador formado por las universidades de Brandeis, Northwestern, Rockefeller y Virginia y el Instituto Scripps de Investigación en la Jolla.

A comienzos de los años sesenta, el grupo de Jürgen Aschoff, del Instituto Max Planck de Fisiología del Comportamiento en Seewiesen, demostró que los voluntarios encerrados en un *bunker* experimental —sin luz natural, relojes ni otras pistas acerca del tiempo— mantenían un ciclo casi normal de sueño y vigilia de unas 25 horas.

Más recientemente, los grupos encabezados por Charles Czeisler y Richard E. Kronauer, de la Universidad de Harvard, han determinado que el ritmo circadiano humano es de 24,18 horas. Investigaron el comportamiento de 24 hombres y mujeres (11 de ellos tenían veintitantos años y 13 tenían sesenta años o algo más) que vivieron durante más de tres semanas en un recinto sin más clave horaria que un ciclo débil de luz y oscuridad artificialmente ajustado a 28 horas y que daba a estos individuos la señal para dormir.

Midieron la temperatura corporal de los participantes, que en condiciones normales desciende por la noche, así como la concentración sanguínea de melatonina y de cortisol, una hormona del estrés que mengua su concentración al atardecer. Observaron que, aun cuando se les había prolongado el día en cuatro horas, la temperatura corporal y los niveles de melatonina y cortisol seguían funcionando de acuerdo con su propio reloj circadiano interno de 24 horas. Además, no parecía que la edad influyera en la cadencia del reloj. Aunque los resultados obtenidos en estudios anteriores sugerían que la edad alteraba los ritmos circadiano, en la investigación de Harvard las fluctuaciones hormonales y de temperatura corporal de los individuos de más edad seguían siendo tan regulares como las del grupo de sujetos más jóvenes.

Por muy fructíferos que fueran los estudios del *bunker*, hubo que recurrir a las moscas del vinagre para investigar los genes responsables del reloj biológico. Las moscas son ideales para los estudios genéticos gracias a su vida corta y tamaño manejable, factores que posibilitan realizar cultivos e intercambiar miles de ellos en el laboratorio hasta que empiecen a aparecer en número creciente las mutaciones de interés. Para acelerar el proceso de mutación, se exponen los insectos a agentes químicos inductores de la misma.

A principios de los setenta Ron Konopka y Seymour Benzer, del Instituto de Tecnología de California, daban cuenta de las primeras moscas mutantes que presentaban ritmos circadianos alterados. Les administraron un agente mutágeno; registraron, luego, el movimiento de 2000 individuos de la progenie, sirviéndose en parte de un aparato similar al que empleamos ahora nosotros en los vuelos simulados. La mayoría de las moscas tenían un ritmo circadiano normal: persistían activas unas 12 horas del día, para descansar las doce siguientes. Pero en tres de las moscas había mutaciones que alteraron esa pauta. Una seguía un ciclo de 19 horas, otra un ciclo de 28 horas y la tercera carecía de ritmo circadiano, descansando y entrando en actividad de forma errática.

En 1986 mi grupo de trabajo de la Universidad de Rockefeller y el que dirige Jeffrey Hall en la Universidad de Brandeis, y Michael Rosbash en el Instituto Howard Hughes, también en Brandeis, hallaron que las tres moscas mutantes mostraban tres alteraciones diferentes en el gen *period*, o *per*; un gen que habíamos aislado, cada grupo por separado, dos años antes. Ante el fenómeno de que mutaciones diferentes en un mismo gen causaran tres comportamientos, pensamos

RELOJES POR TODAS PARTES

NO ESTAN SOLO EN EL CEREBRO

En su mayor parte, la investigación sobre los relojes biológicos se ha centrado en el cerebro. Pero no es éste el único órgano que observa un ritmo de día y noche.

Jadwiga Giebultowicz, de la Universidad estatal de Oregón, ha identificado proteínas PER y TIM —componentes clave de los relojes biológicos— en los túbulos malpighianos de la mosca del vinagre, semejantes a los que vemos en el riñón. También ha observado que las proteínas se sintetizan según un ciclo circadiano; aumentan de noche y decrecen de día. El ciclo se mantiene incluso en moscas decapitadas, lo que demuestra que las células malpighianas no responden sólo a señales procedentes del cerebro del insecto.

El grupo de investigación de Steve Kay, del Instituto Scripps de Investigación en La Jolla, ha obtenido, además, pruebas de la existencia de relojes biológicos en las alas, patas, partes bucales y antenas de la mosca del vinagre. Al transferir genes que regulan la síntesis de proteínas PER fluorescentes a moscas vivas, el grupo de Kay ha puesto de manifiesto que cada tejido lleva un reloj fotorreceptor, independiente. Los relojes siguen funcionando y responden a la luz cuando se extraen los tejidos del insecto para su análisis.

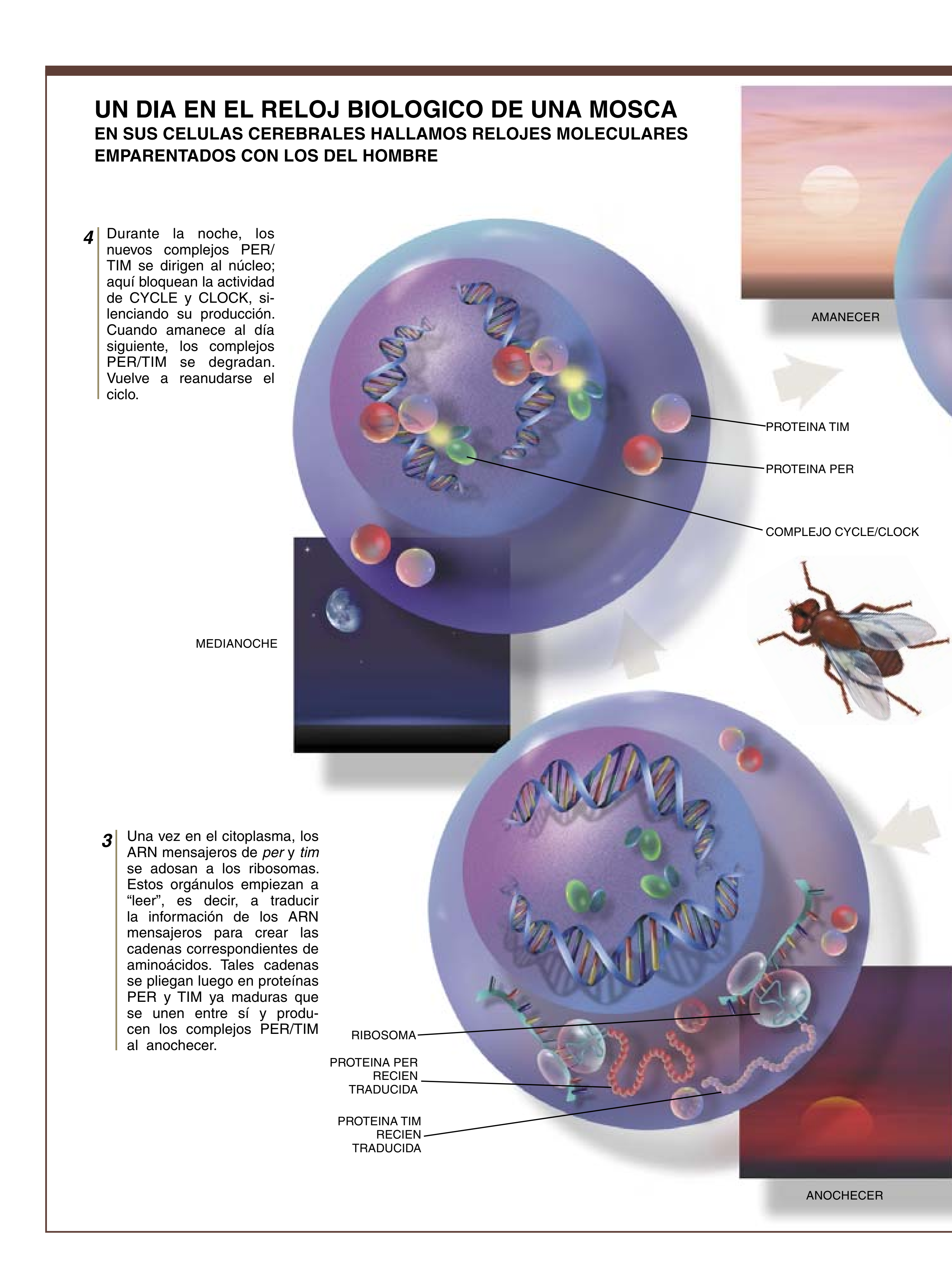
Los relojes biológicos extracraneales no son algo privativo de las moscas del vinagre. Ueli Schibler, de la Universidad de Ginebra, demostró en 1998 que operan también según un ciclo circadiano los genes *per* de fibroblastos de rata, células del tejido conjuntivo.

Ante la diversidad de tipos celulares que presentan actividad de reloj circadiano, cabe inferir que, en muchos tejidos, la sincronización reviste interés suficiente para garantizar su seguimiento local. Estos hallazgos podrían aportar un significado nuevo a la expresión "reloj biológico".

—M.W.Y.



EN LA CABEZA de la mosca del vinagre hay varios relojes biológicos. Las células extraídas de las partes bucales y antenas reflejan la misma respuesta ante ciclos de luz y oscuridad que otras células pertenecientes al cerebro.

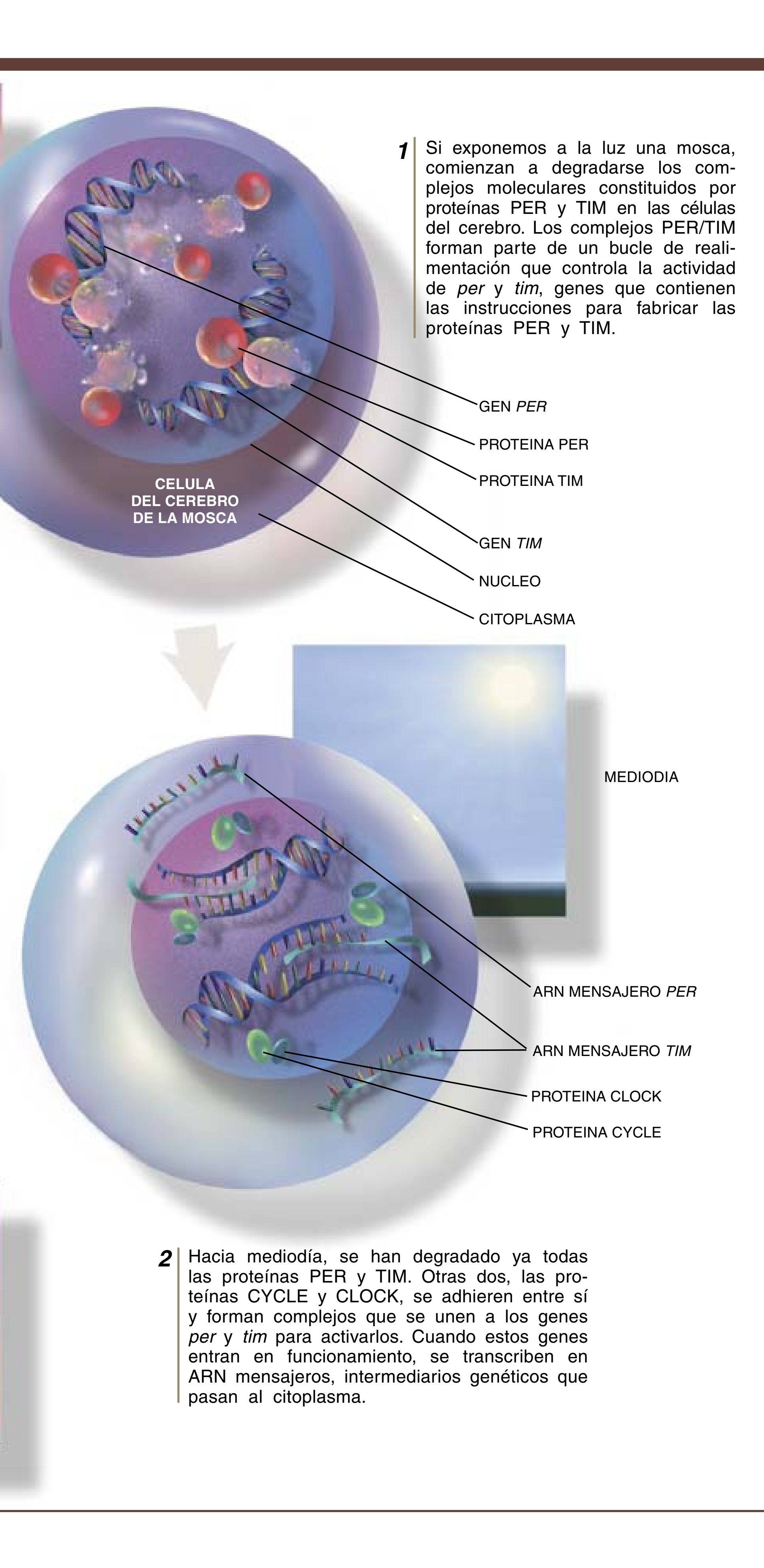


UN DIA EN EL RELOJ BIOLOGICO DE UNA MOSCA

EN SUS CELULAS CEREBRALES HALLAMOS RELOJES MOLECULARES EMPARENTADOS CON LOS DEL HOMBRE

4 Durante la noche, los nuevos complejos PER/TIM se dirigen al núcleo; aquí bloquean la actividad de CYCLE y CLOCK, silenciando su producción. Cuando amanece al día siguiente, los complejos PER/TIM se degradan. Vuelve a reanudarse el ciclo.

3 Una vez en el citoplasma, los ARN mensajeros de *per* y *tim* se adosan a los ribosomas. Estos orgánulos empiezan a “leer”, es decir, a traducir la información de los ARN mensajeros para crear las cadenas correspondientes de aminoácidos. Tales cadenas se pliegan luego en proteínas PER y TIM ya maduras que se unen entre sí y producen los complejos PER/TIM al anochecer.



que *per* se hallaba involucrado en la producción del ritmo circadiano y en la fijación de la cadencia de ese ritmo.

Aislado el gen, cabía preguntarse si controlaba en solitario el ciclo de día y noche. Para averiguarlo, Amita Sehgal y Jeffrey Price, becarios de mi laboratorio, examinaron más de 7000 moscas; buscaron si había más mutantes con el ritmo alterado. Por fin dieron con una mosca que, al igual que una de las mutantes *per*, carecía de ritmo circadiano manifiesto. La nueva mutante presentaba interesado el cromosoma 2, mientras que el *per* pertenecía al cromosoma X. Supimos entonces que teníamos un gen nuevo; lo llamamos *timeless*, o *tim*.

¿Qué relación guardaba el nuevo gen con *per*? Los genes constan de ADN, que porta las instrucciones de la síntesis de proteínas. El ADN nunca abandona el núcleo de la célula; sus órdenes moleculares se leen ARNm mediante, que sí sale del núcleo y penetra en el citoplasma, donde se fabrican las proteínas. Con los genes *tim* y *per* acometimos la síntesis *in vitro* de las proteínas PER y TIM. En colaboración con Charles Weitz, de la Facultad de Medicina de Harvard, observamos que, si mezclábamos las dos proteínas, éstas se adherían entre sí; podrían, pues, interaccionar en el interior de la célula.

Tras una cohorte de experimentos, comprobamos que la producción de las proteínas PER y TIM implicaba un bucle de realimentación de tipo reloj. Los genes *per* y *tim* permanecían activos hasta que las concentraciones de sus proteínas respectivas alcanzaban un nivel de concentración suficiente para que éstas se juntaran. Formaban entonces complejos que penetraban en el núcleo y bloqueaban los genes correspondientes. Pasadas unas horas, las enzimas degradaban los complejos, los genes tornaban a activarse y se iteraba de nuevo el ciclo.

El movimiento de las manecillas del reloj

Una vez que hubimos encontrado dos genes que operaban concertados para crear un reloj molecular, nos planteamos conocer de qué modo arrancaba y se ponía en hora. Después de todo, nuestros ciclos de sueño y vigilia se adaptan muy bien a los viajes entre distintos husos horarios, aunque el reajuste quizá requiera un par de días o una semana.

CAMBIOS EN EL ORGANISMO EN EL PERIODO DE 24 HORAS

1:00 A.M.
- Es la hora más probable de que las embarazadas alumbren.
- Alcanzan su apogeo los linfocitos T coadyuvantes, células del sistema inmunitario.

2:00 A.M.
- Ascienden a su cota máxima los niveles de hormona del crecimiento.

4:00 A.M.
- Es el momento proclive para los ataques de asma.

6:00 A.M.
- Momento más probable del inicio de la menstruación.
- Los niveles sanguíneos de insulina están en su mínimo.
- Comienza la subida de la presión sanguínea y se aviva el ritmo cardíaco
- Aumentan los niveles de cortisol, una hormona del estrés.
- Empiezan a descender los niveles de melatonina.

7:00 A.M.
- El peor momento de los síntomas de la fiebre del heno

8:00 A.M.
- Riesgo máximo de un ataque al corazón o un derrame cerebral.
- El peor momento para la artritis reumatoide.
- Los linfocitos T coadyuvantes están en su nivel más bajo del día.

Mediodía
- Alcanza su máximo el nivel de hemoglobina en sangre.

3:00 P.M.
- Apogeo de la fuerza prensil, el ritmo respiratorio y la sensibilidad de los reflejos.

4:00 P.M.
- Punto máximo de la temperatura corporal, ritmo cardíaco y presión sanguínea.

6:00 P.M.
- El flujo urinario está en su máximo.

9:00 P.M.
- El umbral del dolor es mínimo

11:00 P.M.
- Probabilidad máxima de la respuesta alérgica.

Eso sucede cuando comenzamos a trasladar las bandejas de moscas de "Nueva York" a "San Francisco". Entre las primeras cosas que observamos fue que, si pasábamos una mosca de una incubadora oscura a otra brillantemente iluminada para imitar la luz del día, las proteínas TIM desaparecían del cerebro de la mosca en cuestión de minutos.

Y lo que revestía mayor interés: la dirección en que "viajaban" las moscas afectaba a los niveles de sus proteínas TIM. Si sacábamos a las moscas de "Nueva York" a las 8 de la tarde, cuando ya había oscurecido, y las colocábamos en "San Francisco", donde todavía había luz a las 5 de la tarde, los niveles de TIM se hundían. Pero una hora más tarde, cuando las luces se apagaban en "San Francisco", la proteína TIM empezaba a acumularse de nuevo. Era evidente que, con la transferencia, los relojes moleculares de las moscas se paraban al principio, para reanudar, tras una demora, la cadencia de acuerdo con el nuevo huso horario.

Por contra, las moscas trasladadas a las 4 de la mañana desde "San Francisco" experimentaban una prematura salida del sol en "Nueva York", donde eran las 7 de la mañana. Este viaje provocaba también la caída de los niveles de TIM, pero ahora la proteína no comenzaba a acumularse porque se había adelantado el reloj molecular con el cambio de huso horario.

El examen de la evolución de la síntesis del ARN correspondiente al gen *tim* nos enseñó nuevas cosas sobre el mecanismo subyacente bajo las diferentes respuestas moleculares. Los niveles de este ácido nucleico son más altos a las 8 de la tarde y más bajos entre las 6 y las 8 de la mañana. Una mosca trasladada a las 8 de la tarde de "Nueva York" a "San Francisco" produce niveles máximos de ARN de *tim*; por eso, la proteína perdida por la exposición a la luz en "San Francisco" se reemplaza fácilmente tras el ocaso en su nuevo destino. Pero la mosca que viaje a las 4 de la mañana de "San Francisco" a "Nueva York", fabricaría muy poco ARN de *tim* antes de la partida. Lo que la mosca experimenta como una temprana salida del sol provoca la eliminación de TIM y permite que el ciclo siguiente de producción empiece con un horario adelantado.

REGISTRO DE LOS RITMOS CIRCADIANOS DE LAS MOSCAS

MONTAJE EXPERIMENTAL PARA SEGUIR LA ACTIVIDAD VOLADORA DE LA MOSCA

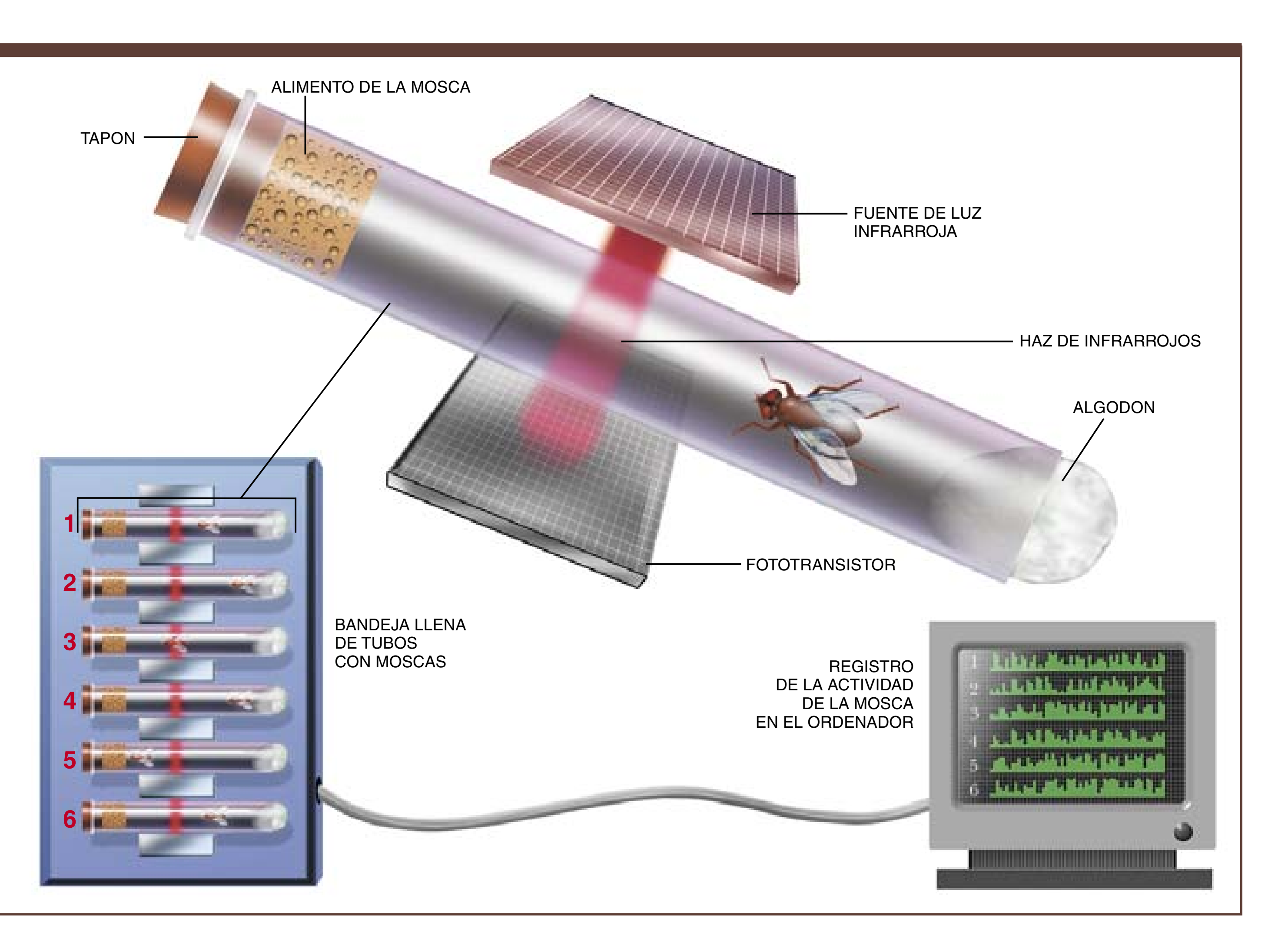
Para descubrir qué genes intervenían en el ciclo de actividad noche-día de las moscas del vinagre, se las expuso a substancias inductoras de mutaciones génicas, que se reflejarían en su progenie. Cuando los descendientes llegan a la madurez, se les encierra en tubos de vidrio. Los tubos, individuales, tienen en un extremo el alimento para las moscas y, en el otro, un algodón que permite el paso del aire.

Se colocan los tubos en bandejas especiales, equipadas con luces de rayos infrarrojos y detectores. La mosca del vinagre, por norma, descansa durante la noche y está activa durante el día. Las bandejas, conectadas a un ordenador, registran cada movimiento de la mosca al señalar cuántas veces atraviesa un haz de rayos infrarrojos. El análisis de miles de moscas mutantes con este sistema nos descubre que algunas presentan anomalías en los ritmos circadianos. —*M.W.Y.*

No sólo los insectos

El estudio de estos saltos horarios en las moscas nos ha ayudado a entender los ritmos circadianos de los mamíferos, hombre incluido. En 1997, Cheng Chi Lee, de la Facultad de Medicina de Baylor, por un lado, y, por otro, el grupo encabezado por Hajime Tei, de la Universidad de Tokio, e Hitoshi Okamura, de la Universidad de Kobe, aislaron en el ratón y en el hombre equivalentes del gen *per*. La investigación subsiguiente, que contó con la implicación de numerosos laboratorios, condujo al aislamiento en 1998 de genes *tim* humanos y de ratón. Los genes demostraron su actividad en el núcleo supraquiasmático.

Los estudios con ratones contribuyeron también a la solución de una cuestión clave. ¿Qué es lo que insta, en primera instancia, la actividad de los genes *per* y *tim*? En 1997 el grupo de Joseph Takahashi, del Instituto Howard Hughes de la Universidad Northwestern, aisló el gen



Clock, así lo llamaron, cuya versión mutada producía ratones sin un ritmo circadiano definido. El gen cifra un factor de transcripción, una proteína que en este caso se unía al ADN y permitía que se leyera transcrito en ARN mensajero.

No tardó en aislarse, en la mosca, una versión del gen *Clock* del ratón. Varios equipos empezaron a introducir combinaciones de genes *per*, *tim* y *Clock* en células de mamíferos y de moscas del vinagre. Tales experimentos revelaron que la proteína CLOCK tenía por diana el gen *per* en el ratón; y los genes *per* y *tim*, en la mosca. El sistema cerraba un círculo completo: en las moscas, cuyos relojes son los mejor conocidos, la proteína CLOCK —en combinación con la proteína codificada por el gen *cycle*— se une a los genes *per* y *tim* para activarlos, pero sólo si no están presentes en el núcleo las proteínas PER y TIM. Los cuatro genes con sus proteínas constituyen el corazón del reloj biológico en las moscas. Con algunas modificaciones forman el mecanismo responsable de los ritmos circadianos en el reino animal, de los peces a las ranas, de los ratones al hombre.

El grupo de Steve Reppert, en Harvard, y Justin Blau, en mi laboratorio, acaban de abordar las señales específicas que sincronizan los relojes biológicos con los momentos de diversas conductas, con las fluctuaciones hormonales y con otras funciones. Todo indica que algunos genes de interés se ponen en marcha mediante la interacción directa con la proteína CLOCK. Por su parte, PER y TIM atenazan la capacidad de CLOCK de activar dichos genes, al propio tiempo que producen las oscilaciones del bucle central de realimentación, instaurando pautas generales de actividad génica cíclica.

Se nos avecina un futuro en el que se obtendrá, en la mosca del vinagre y el ratón, un sistema entero de genes regulados por su reloj biológico. Con toda verosimilitud, se descubrirán, en el seno de esas redes, productos sin caracterizar todavía que ejercen efectos llamativos sobre el comportamiento. Tal vez uno de esos productos, si no un componente del propio reloj molecular, sea un blanco idóneo para los fármacos que alivien los trastornos provocados por los cambios horarios, los efectos secundarios de los turnos de trabajo, las alteraciones del sueño y las depresiones que les acompañan.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

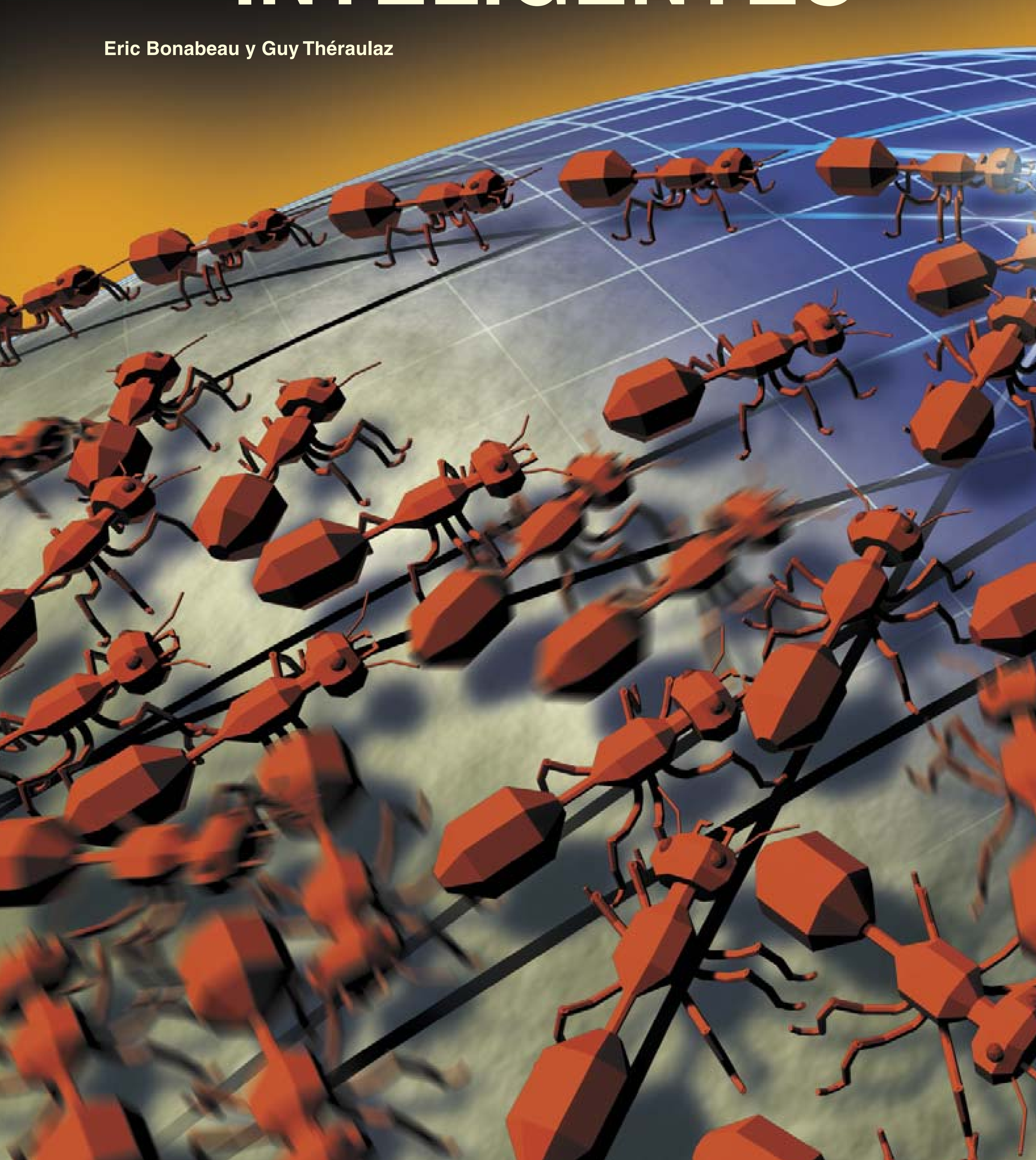
THE MOLECULAR CONTROL OF CIRCADIAN BEHAVIORAL RHYTHMS AND THEIR ENTRAINMENT IN *DROSOPHILA*. Michael W. Young en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 67, págs. 135-152; 1998.

MOLECULAR BASIS FOR CIRCADIAN CLOCKS. Jay C. Dunlap en *Cell*, vol. 96, n.º 2, págs. 271-290; 22 de enero de 1999.

TIME, LOVE, MEMORY: A GREAT BIOLOGIST AND HIS QUEST FOR THE ORIGINS OF BEHAVIOR. J. Weiner. Alfred Knopf, 1999.

ENJAMBRES INTELIGENTES

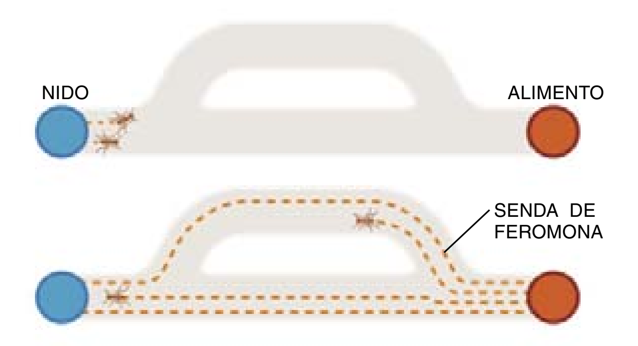
Eric Bonabeau y Guy Théraulaz



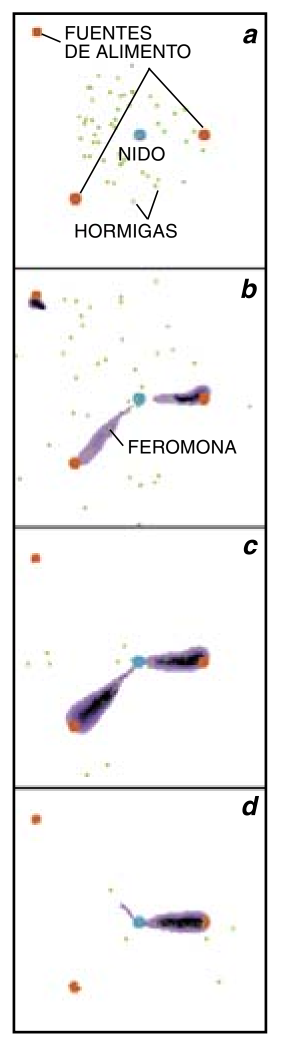
A imagen de los insectos sociales, se han creado agentes cibernéticos capaces de cooperar en la resolución del redireccionamiento del tráfico en redes muy cargadas y de otros problemas

Desde tiempo inmemorial, los insectos sociales —hormigas, abejas, avispas o termitas— han fascinado por igual a biólogos y artistas. Maurice Maeterlinck escribía en cierta ocasión: "¿Qué es lo que aquí gobierna? ¿Qué lo que emite órdenes, prevé el futuro, elabora planes y mantiene el equilibrio?" Preguntas sin fácil respuesta.

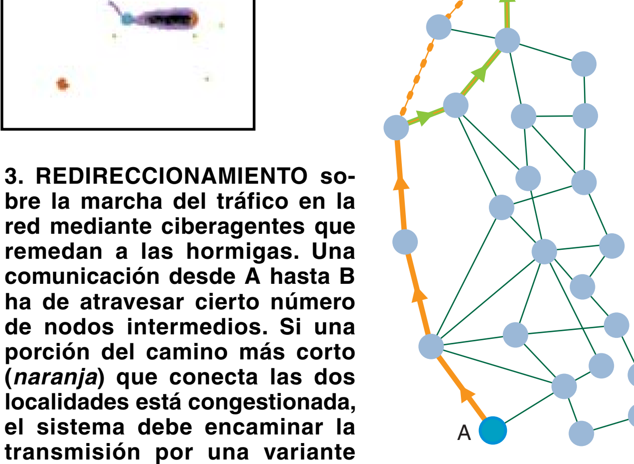
Cada insecto de la colonia parece tener un programa de actividades propio; y sin embargo, el grupo, en su conjunto, da la impresión de operar al unísono, organizado. Nada indica que la impecable integración de actividades requiera supervisión alguna. Antes bien, el estudio de la conducta de los insectos sociales ha revelado que la cooperación, tomada la colonia en su conjunto, parece implantarse por sí sola: en numerosas situaciones, la coordinación es fruto de interacciones entre individuos. Aunque tales interacciones sean elementales (la hormiga que sigue el rastro que otra ha dejado), resuelven colectivamente problemas difíciles (así, la determinación de la ruta más corta entre el sinfín de las conducentes hasta una fuente de alimento). A ese comportamiento colectivo, resultante de la interacción de un grupo, se le denomina "inteligencia de enjambre."



1. LAS SENDAS de feromona capacitan a las hormigas para un forrajeo eficiente. Dos hormigas salen del nido al mismo tiempo (*arriba*), por distintos caminos, que van marcando con feromona. La hormiga que tomó el más corto es la primera en regresar (*abajo*). Dado que esta senda se encuentra ahora marcada con doble cantidad de feromona, atraerá a otras hormigas más que la ruta larga.



2. EXPLOTACION SECUENCIAL de las distintas fuentes de alimento, debido a la evaporación de feromona. En esta simulación informática, se han situado a diferente distancia del nido tres fuentes idénticas de provisiones. Tras forrajear al azar (*a*), las hormigas empiezan a explotar las fuentes de alimento más cercanas (*b, c*). Conforme se van agotando, disminuye evaporada la concentración de feromona correspondiente a sus sendas (*d*). Las hormigas empezarán entonces a explotar la fuente más alejada.



3. REDIRECCIONAMIENTO sobre la marcha del tráfico en la red mediante ciberagentes que remedan a las hormigas. Una comunicación desde A hasta B ha de atravesar cierto número de nodos intermedios. Si una porción del camino más corto (*naranja*) que conecta las dos localidades está congestionada, el sistema debe encaminar la transmisión por una variante (*verde*). El redireccionamiento automático puede quedar encomendado a agentes cibernéticos que operan de forma parecida al modo en que las hormigas explotan las fuentes de alimento (*arriba*). En la analogía, una ruta congestionada equivale a una fuente de alimento agotada.

De un tiempo a esta parte la ciencia se esfuerza por descubrir nuevos modos de aplicar esta forma de inteligencia a diversas tareas. En el proceder de las hormigas durante el forrajeo se inspira un nuevo método para reencaminar el tráfico en redes de telecomunicaciones atestadas. La atención a la cooperación interactiva entre las hormigas que transportan una pieza grande de alimento puede desembocar en mejores algoritmos para robots. El modo en que los insectos apiñan a los muertos y en que clasifican las larvas facilita el análisis de datos bancarios. Y la división del trabajo entre las abejas obreras podría contribuir a "estilizar" las líneas de montaje fabriles.

Forrajeo virtual

En uno de los primeros estudios sobre la inteligencia de enjambre se investigó el comportamiento asociado al forrajeo en las hormigas. El grupo encabezado por Jean-Louis Deneubourg, de la Universidad Libre de Bruselas, demostró que las "caravanas" de hormigas que vemos en el campo, o en la cocina, son resultado de la exudación de una feromona, una sustancia química, que atrae a otras hormigas. Deneubourg demostró también que este proceso de deposición de rastro de feromonas que otros individuos puedan seguir constituye una estrategia excelente para hallar el camino más corto entre un nido y una fuente de provisiones.

En experimentos realizados con la hormiga *Linepithema humile*, Deneubourg construyó un puente con dos ramales, doble de largo uno que el otro, que mediaba entre un nido y una fuente de alimento. En pocos minutos la colonia seleccionaba la rama más corta. Deneubourg descubrió que, al forrajear, las hormigas depositan y siguen rastros de feromona. Las primeras en regresar al nido desde la fuente son las que han tomado el camino más corto de ida y vuelta: del nido a la fuente y viceversa. Por ser esa ruta la primera en quedar doblemente marcada con feromona, las compañeras se sienten atraídas hacia ella.

Pero si se les ofrece la variante corta después de la rama larga, las hormigas no la tomarán, porque la rama larga se encuentra ya marcada con feromona. En un sistema cibernético, se puede superar el inconveniente introduciendo la degradación de feromona: cuando la señal química se evapora rápidamente, en los caminos largos resulta difícil mantener rastros estables de feromona. Las "ciberhormigas" pueden entonces seleccionar una rama más corta, aun cuando su descubrimiento sea tardío. Se trata de una propiedad sumamente deseable, ya que impide que el sistema converja hacia soluciones mediocres. (En *L. humile*, las concentraciones de feromona sí decrecen, pero a ritmo muy lento.)

En una simulación computarizada de la evaporación de feromonas, se presentaron a una colonia artificial fuentes de alimento idénticas, aunque ubicadas a distintas distancias del nido. Al principio, las hormigas virtuales fueron explorando su medio al azar. Llegaron después a establecer sendas que conectaban el nido con todas las fuentes de alimento. Posteriormente mantuvieron sólo las sendas de las fuentes de alimento inmediatas al nido, con la consiguiente explotación de tales suministros. Agotados éstos, las hormigas virtuales llevaron sus excursiones hasta las fuentes más alejadas.

Generalizando este modelo "fórmico", el grupo de Marco Dorigo, de la Universidad Libre de Bruselas, ha ideado un método para resolver el "problema del viajante". El

Hormigas itinerantes

En el problema del viajante, se ha de hallar el itinerario más corto que le permita visitar un número dado de ciudades, pasando exactamente una vez por cada una. Encierra una dificultad demoníaca: en el caso de sólo 15 ciudades son miles de millones los itinerarios posibles.

Se ha empezado a investigar con agentes cibernéticos que remedan a las hormigas, para deducir una solución. El método se basa en hormigas virtuales que van depositando y siguiendo un equivalente digital de los senderos de feromona. Imaginemos una colonia de ciberhormigas, cada una de las cuales va saltando de una ciudad a otra con independencia de las demás, viajando con preferencia a las localidades cercanas, aunque siempre al azar. Tras completar un circuito por todas las ciudades, la hormiga regresa a los enlaces que ha utilizado y deposita feromona en ellos. La cantidad de sustancia es inversamente proporcional a la longitud del circuito: cuanto menor la distancia, más feromona recibe cada enlace. Así, después de que todas las hormigas hayan completado sus circuitos y repartido su feromona, los enlaces que pertenezcan a mayor número de periplos cortos serán los más ricos en sustancia. Dado que la feromona se evapora, los enlaces de las rutas largas acabarán conteniendo una cantidad bastante menor de la sustancia que los integrados en itinerarios cortos.

La colonia de ciberhormigas queda después en libertad para viajar de nuevo por las ciudades, pero esta vez guiadas por los rastros de feromona anteriores (siendo favorecidos los enlaces de concentración alta) así como por las distancias interurbanas (las localidades cercanas tienen preferencia), datos que las ciberhormigas pueden obtener consultando una tabla que recoge tales números. En general, los dos criterios —intensidad de feromona y distancia interurbana— reciben ponderación aproximadamente igual.

Marco Dorigo y su grupo han traducido a programas y ensayado en la práctica este sistema inspirado en un hormiguero. Su enfoque da por supuesto que los enlaces favorecidos, al ser tomados en conjunto, conducirán a un itinerario general corto. Dorigo ha descubierto que, tras repetir numerosas veces el proceso (terminación del circuito seguida por refuerzo y evaporación de feromona), las hormigas artificiales se hallan capacitadas para obtener itinerarios cada vez más cortos, como el expuesto en la ilustración.

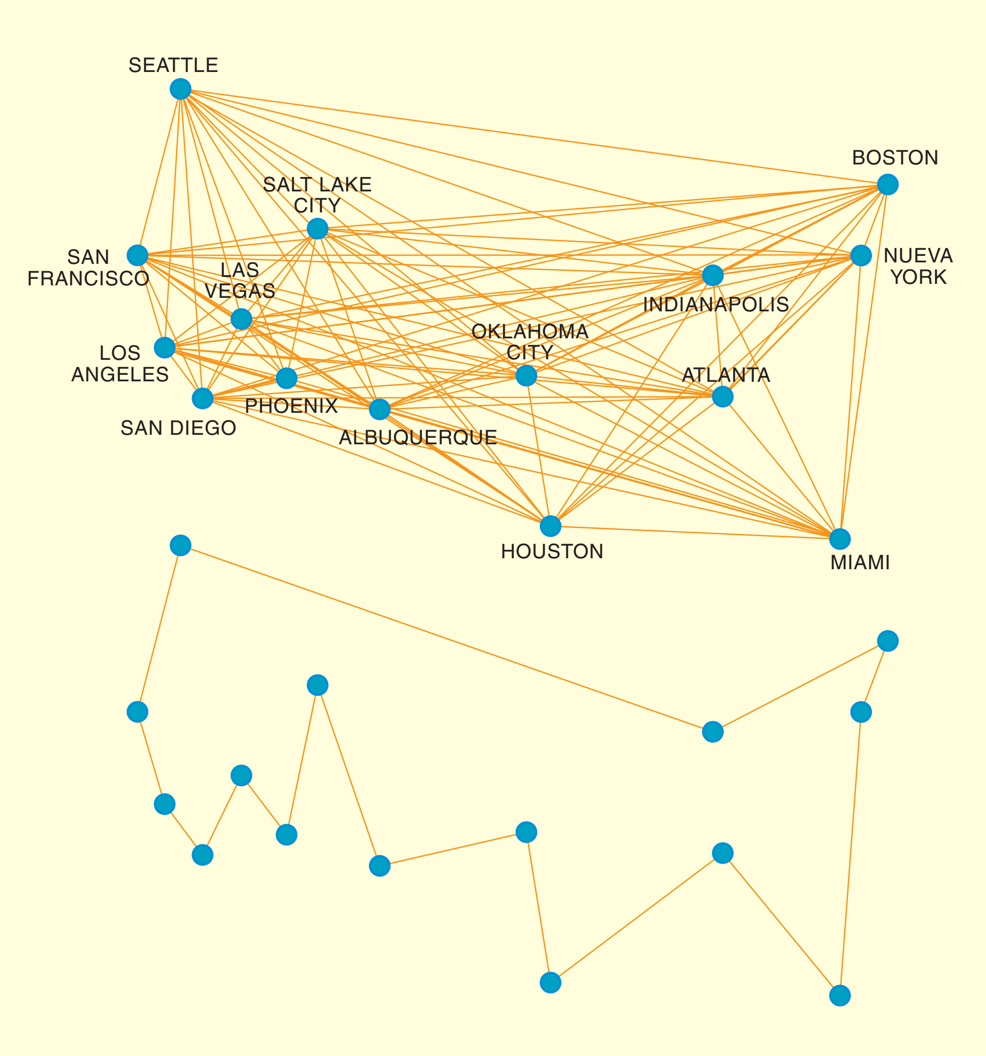
No obstante, surge una dificultad cuando muchas de las rutas utilizan un enlace que, según más adelante se comprueba, no forma parte de un itinerario corto. (De hecho, tal enlace podría pertenecer a muchísimas rutas largas.) Dorigo observó que, aunque este enlace tan frecuentado pueda sesgar la búsqueda durante varias iteraciones, acabará sustituido por una conexión mejor. Esta optimización es consecuencia de la sutil interacción entre refuerzo y evaporación, que garantiza que sólo sobrevivan los mejores enlaces. En concreto, el azar se encargará de que en algún momento resulte seleccionado un enlace distinto integrado en una ruta corta, que recibirá mayor refuerzo que el tramo frecuentado, el cual, conforme vaya evaporándose su feromona, irá perdiendo atractivo para las hormigas artificiales.

Se plantea otro problema cuando una ruta corta contiene un enlace muy largo que tiene, inicialmente, poca probabilidad de utilizarse. Pero Dorigo ha demostrado que, aun cuando tal conexión arranque lentamente, una vez seleccionada, quedará más reforzada que otros enlaces que compitan con ella.

Importa señalar que este método resulta eficaz para hallar circuitos cortos, pero no proporciona necesariamente el más corto. Sin embargo, tales soluciones cuasi-óptimas suelen ser más que adecuadas, especialmente porque la determinación de la ruta mínima puede exigir un esfuerzo computacional desmesurado. De hecho, la determinación de la solución óptima resulta inabordable al aumentar el número de ciudades.

El sistema de Dorigo ofrece una ventaja adicional: su flexibilidad intrínseca. Dado que las hormigas artificiales exploran distintos senderos, los rastros de feromona proporcionan planes de reserva o salvaguardia. De esta forma, en el caso de que se rompa algún enlace, cuenta con un repertorio de alternativas.

—*E. B.* y *G. T.*



problema solicita determinar el itinerario más corto que visita exactamente una vez por cada una de las ciudades de una lista. De difícil resolución, pertenece a la clase de los problemas "NP-completos": el número de pasos computacionales requerido para resolverlo aumenta más deprisa que cualquier potencia entera del número de ciudades. (NP denota no-determinístico polinómico.) Ante problemas de tal naturaleza, lo habitual es hallar una solución buena, aunque no sea necesariamente la óptima (es decir, un itinerario corto, aunque no sea el más corto de todos). Dorigo ha demostrado que puede conseguir itinerarios cuasi-óptimos valiéndose de hormigas artificiales, ajustadas de modo que la dosis de feromona que depositen varíe con las distancias totales que han recorrido.

Métodos similares han resultado fecundos en tareas de optimización. En ese orden, las hormigas artificiales proporcionan la solución óptima del problema de asignación cuadrática, en el cual se ha de distribuir entre varias fábricas la manufactura de cierto número de bienes, de modo que sea mínima la distancia total que deben recorrer las piezas entre instalaciones. En una aplicación afín, David Gregg y Vincent Darley han desarrollado un método "con base fórmica" para reducir el tiempo requerido en la realización de una determinada cantidad de trabajo en una gran planta de Unilever. El sistema ha de asignar eficientemente diversos tanques de almacenamiento, mezcladores químicos, líneas de empaquetado y otros equipos.

Además de resolver problemas de optimización cuya naturaleza es estática, es decir, no variable, los ciberagentes fórmicos pueden afrontar fallos y ambientes dinámicos; por ejemplo, la avería de una máquina en una fábrica. Debido a que mantienen sendas de feromona y a que exploran sin cesar nuevos caminos, las ciberhormigas establecen sin proponérselo planes de reserva, y se encuentran por ello preparadas para responder a cambios en su ambiente. Esta propiedad, posible razón del éxito ecológico de las hormigas, es crucial en muchas aplicaciones.

Tomemos la impredictibilidad dinámica de una red telefónica. La llamada telefónica entre dos puntos A y B ha de pasar por cierto número de nodos intermedios —centrales o subcentrales— que precisan de un mecanismo que le diga a la llamada adónde ha de ser dirigida a continuación para establecer la conexión desde A hasta B solicitada. Para minimizar las demoras, el algoritmo correspondiente a este proceso ha de evitar las áreas congestionadas; cuando la situación es susceptible de cambios bruscos, los itinerarios de reserva resultan muy valiosos. Las malas condiciones meteorológicas en un aeropuerto o los concursos de televisión que invitan a la participación telefónica pueden provocar avalanchas transitorias de tráfico en la red, lo que exige el redireccionamiento sobre la marcha, encaminando las llamadas hacia las porciones menos ocupadas del sistema.

Para atender a situaciones de este tipo, Ruud Schoonderwoerd, Janet Bruten y Owen Holland han inventado una técnica de redireccionamiento en la que ciberagentes fórmicos depositan pequeñas dosis de información, "feromona virtual", en los nodos de la red, para reforzar las rutas que pasan por áreas no congestionadas. Entretanto, un mecanismo de evaporación ajusta la información sobre los nodos, para disuadir de las rutas que atraviesen áreas muy ocupadas.

Cada nodo conserva una tabla de direcciones que dice a las llamadas telefónicas adónde han de encaminarse, según su destino. Agentes fórmicos ajustan sin cesar las

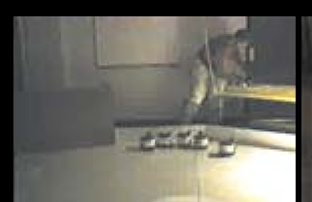
Transporte cooperativo en hormigas y en robots

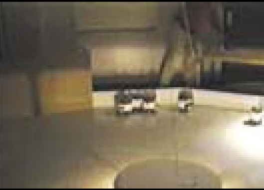


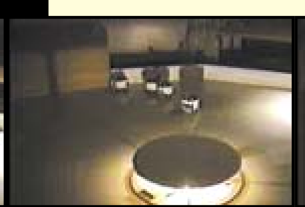
En ciertas especies, cuando un individuo no es capaz de transportar una presa grande se reclutan compañeras de nido. Durante un período inicial que puede llegar a durar minutos, las hormigas van cambiando su posición y distribución en torno al objeto hasta que acarrean la pieza al nido.

Tal conducta ha sido reproducida por C. Ronald Kube y Hong Zhang con robots mecánicos. La tarea encomen-

4. COLABORACION ENTRE HORMIGAS para plegar una hoja grande (*izquierda*). Este trabajo cooperativo ha inspirado los programas de robots sin recurrir a complicaciones excesivas. En un experimento realizado en la Universidad de Alberta (*abajo*), los robots han de empujar una caja circular iluminada hacia una luz. Pese a que ningún robot (*derecha*) se comunica con los demás y actúa por su cuenta, atendiendo a un conjunto sencillo de instrucciones, el grupo logra, en conjunto, su objetivo.











entradas de la tabla —las “puntuaciones”— para que reflejen el estado actual de la red. Si un agente experimenta una gran demora, por haber viajado a través de una porción muy congestionada de la red, añadirá apenas un poquito de “feromona” a las entradas de la tabla que enviarían llamadas a la zona sobrecargada. En términos matemáticos, las puntuaciones de los nodos correspondientes apenas aumentarían en una pequeña cantidad. Por otra parte, si el agente lograse llegar rápidamente de un nodo a otro, reforzaría el uso de ese camino depositando gran cantidad de feromona, es decir, incrementando las puntuaciones. Los cálculos son de tal naturaleza, que aun cuando una vía esté muy ocupada —es decir, aunque sean muchos los agentes que viajan por ella— su feromona total acumulada podría resultar menor que la de una vía despejada, con pocos agentes.

El sistema elimina soluciones caducas aplicando una forma matemática de evaporación: todas las entradas de la tabla se recortan regularmente en una pequeña cuantía. Este proceso, amén de la forma en que los agentes fórmicos aumentan puntuaciones, está diseñado para operar en tándem, de manera que las rutas ocupadas experimenten mayor evaporación que refuerzo, mientras que en las rutas descongestionadas se produce el efecto contrario.

Los equilibrios entre evaporación y refuerzo se perturban fácilmente. Cuando se congestiona una ruta que hasta el momento era adecuada, sufren retrasos los agentes que la toman; el efecto de evaporación supera al de refuerzo. La ruta no tarda en abandonarse, y los agentes descubren (quizá por segunda vez) otras opciones más ventajosas. Los beneficios son dobles: cuando las llamadas telefónicas se encauzan hacia trayectorias más convenientes, el proceso no sólo permite que las llamadas la atraviesen expeditas, sino también que las zonas congestionadas se recuperen de la sobrecarga.

Varias compañías se sirven de ese proceder para la gestión del tráfico en sus redes. France Télécom y British Telecommunications aplican a sus sistemas técnicas de direccionamiento basadas en hormigas virtuales. En EE.UU., MCI Worldcom ha estado investigando en hormigas artificiales no sólo para la gestión de la red de la compañía, sino también para la facturación a los usuarios. La aplicación definitiva, empero, podría encontrarse en Internet, donde el tráfico resulta impredictible.

Para gestionar las exigentes condiciones de la Red, Dorigo y Gianni Di Caro han refinado los agentes fórmicos tomando en consideración el tiempo total que tarda la información en llegar desde su origen hasta su destino. (El método para redes telefónicas sólo atiende al tiempo de tránsito de un nodo a otro, dándose por supuesto que el tráfico de sentido opuesto es el mismo.) Los resultados de las simulaciones indican que el sistema de Dorigo y Di Caro supera en rendimiento a todos los demás métodos de direccionamiento, tanto si se busca la maximización del flujo transmitido como la minimización de las demoras. Todo indica que el método del hormiguero es superior al protocolo utilizado en Internet —tomar primero el camino más corto (“Open Shortest Path First”)— en el cual los nodos tienen que informar continuamente unos a otros del estado de los enlaces.

Un enjambre de aplicaciones

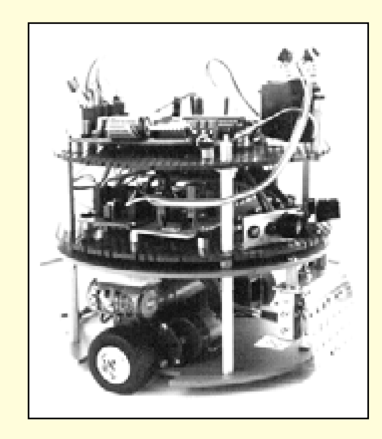
Otras formas de conducta de los insectos sociales han inspirado investigaciones de índole varia. Se estudian enjambres de insectos con la intención de idear diferentes técnicas de control de un grupo de robots. Una de las aplicaciones investigada es el transporte cooperativo. Valiéndose de tales métodos, los ingenieros podrían diseñar robots sencillos y económicos capaces de operar coordinadamente y realizar tareas de creciente

dada a su ejército robótico consistía en empujar una caja hacia una meta; cada individuo estaba programado con instrucciones sencillas: encontrar la caja, establecer contacto con ella, situarse de modo que la caja se halle entre el robot y la meta, y después, empujar la caja hacia aquélla.

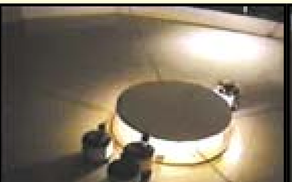
Aunque la programación de los robots fue, deliberadamente, muy burda, la semejanza entre su comportamiento y el de las hormigas resulta muy llamativa. (Los experimentos, grabados en cinta de vídeo, se ofrecen en la dirección http://www.cs.ualberta.ca/~kube/ de la Telaraña.) Al principio los robots se mueven al azar, tratando de encontrar la caja. Una vez localizada, empiezan a empujarla; si no consiguen moverla, cambian de posición y orientación. Se producen incluso retrocesos temporales, como cuando se aleja de la meta la caja. Los robots efectúan reajustes continuos si pierden contacto con la caja, si se entorpecen unos a otros o si la caja, en lugar de avanzar, gira. Y a pesar de sus limitadas capacidades, al final consiguen entregar la caja en su destino.

Evidentemente, los individuos que tratan de empujar un objeto pueden hallar formas de colaboración mucho más eficientes. Pero a causa de su extraordinaria simplicidad, este método inspirado en el hormiguero —en el que, para empezar, no hace falta que los robots se comuniquen entre sí— resulta prometedor para aplicaciones de miniaturización de bajo costo.

—E.B. y *G.T.*









De los cementerios a las bases de datos

En las hormigas de la especie *Messor sancta*, las obreras arracíman los cadáveres para limpiar los nidos. La ilustración secuencia la dinámica de tal organización fúnebre. Si los muertos se distribuyen al azar al principio del experimento, las obreras los habrán apilado en montones en unas horas.

Jean-Louis Deneubourg y su grupo han propuesto una explicación sencilla: las obreras se sienten atraídas hacia los montoncitos e inducidas a depositar más muertos, en una realimentación positiva que conduce a la formación de montones cada vez mayores. Pero se ignoran los procesos individuales subyacentes bajo ese mecanismo de realimentación.

Cabe una explicación similar de otro fenómeno. Las hormigas obreras de la especie *Leptothorax unifasciatus* clasifican sistemáticamente a las recién nacidas de la colonia. Huevos y microlarvas se colocan en el centro de un área cuya periferia se asigna a las larvas de mayor tamaño; en la zona intermedia, quedan pupas y prepupas. De acuerdo con la interpretación ideada, las hormigas recogen y abandonan una u otra según el número de individuos en la misma fase que haya alrededor. Por ejemplo, si una hormiga encuentra una larva grande rodeada por huevos, lo más probable es que recoja a la "pieza larvaria" que no encaja. Y la depositará en una región que contenga otras larvas grandes.

Partiendo del estudio de este reparto zonal de la progenie, Erik Lumer y Baldo Faieta han esbozado un método para la exploración de grandes bases de datos. Imaginemos que un banco desea averiguar qué clientes ofrecen mayores garantías de devolución de préstamos. El problema estriba en que muchos de sus clientes nunca han sido prestatarios.

El banco posee un amplio fichero de perfiles de usuarios, su edad, sexo, estado civil, posesión de vivienda propia, servicios bancarios utilizados y otros datos similares. Si el banco tuviera una forma de representar cúmulos de personas de características similares, su departamento de préstamos podría pronosticar con mayor precisión si un determinado solicitante reintegrará o no el préstamo. En el caso de que el solicitante de una hipoteca perteneciera a un grupo dominado por morosos, su concesión entrañaría un riesgo inaceptable.

Los cúmulos se representan mejor en dos dimensiones (a los humanos les cuesta interpretar un número mayor de dimensiones); por eso, Lumer y Faieta simbolizan a cada cliente mediante un punto en el plano. Cada uno viene a ser algo así como uno de los ítems de la progenie, que las "ciberhormigas" pueden trasladar de un lugar a otro, recogiéndolo y depositándolo según los elementos circundantes. La distancia entre dos clientes indica en qué medida se parecen. Por ejemplo, en razón de la edad, las distancias entre los puntos representativos serán tanto más cortas cuanto menores las diferencias. Las hormigas artificiales realizan las decisiones de reubicación teniendo en cuenta todas las distintas características de los clientes. Y en función de los objetivos del banco, los programas podrían ponderar matemáticamente ciertos atributos más que otros.

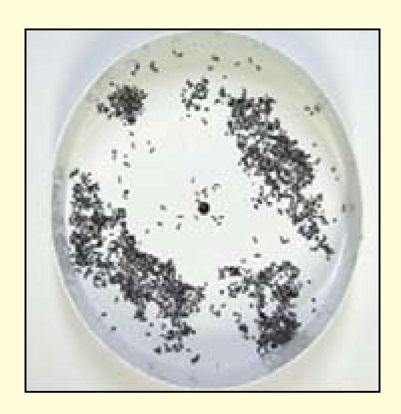
Con tal tipo de análisis, un cúmulo podría contener personas de edades en torno a los 20 años, solteras, residentes en el domicilio familiar y cuyo servicio bancario más popular es el cobro de cheques. Otro grupo podría estar formado por mujeres en torno a los 57 años, casadas o viudas, propietarias de sus viviendas y libres de hipotecas.

Las entidades bancarias o de seguros vienen empleando tipos similares de análisis por cúmulos. Pero el método "fórmico" permite visualizar los datos fácilmente, y exhibe una peculiaridad curiosa: el número de cúmulos emerge automáticamente a partir de los datos, mientras que los métodos habituales suelen fundarse en un número predefinido de grupos en donde se encajan después los datos. Así pues, la clasificación "fórmica" ha resultado efectiva para revelar aspectos de interés que podrían haber permanecido ocultos.

—*E.B.* y *G.T.*









5. LAS HORMIGAS OBRERAS amontonan sus muertos para limpiar los nidos. Al principio de este experimento fueron distribuidos al azar 1500 cadáveres (*arriba*). Al cabo de 26 horas, las obreras han formado tres montones (*abajo*). Esta conducta y la forma en que las obreras clasifican sus larvas han conducido a un tipo de programa de ordenador para el análisis de datos bancarios.

ERIC BONABEAU y GUY THÉRAULAZ estudian el comportamiento de los insectos sociales y su aplicación a la creación de sistemas complejos. Doctorado en física por la Universidad de París, Bonabeau trabaja en EuroBios. Théraulaz se halla adscrito al laboratorio de etología y psicología animal del CNRS en la Universidad Paul Sabatier, en Toulouse.

complejidad. En otro proyecto, un modelo inicialmente introducido para explicar la forma en que las hormigas agrupan a sus muertos y distribuyen sus larvas, se ha trocado en la base metodológica del análisis de datos financieros. Y las investigaciones que estudian la versatilidad con que las abejas asignan tareas podrían conducir a métodos más eficientes de reparto de funciones en las fábricas.

Abundan los ejemplos. Apoyado en la construcción de los nidos de avispas, Dan Petrovich ha diseñado un enjambre de diminutos satélites móviles que se autoensamblan en una estructura predefinida mayor. H. Van Dyke Parunak está desplegando agentes cibernéticos insectomorfos destinados a resolver problemas de producción industrial, como la planificación de una red de proveedores de una fábrica. Paul B. Kantor ha desarrollado una metodología basada en la inteligencia de enjambre para hallar información en la Telaraña y en otras redes. Los cibernautas de la Red en busca de páginas interesantes podrían, si pertenecieran a una "colonia" de usuarios, acceder a información concretada en feromonas digitales (en esencia, valoraciones) depositadas por otros miembros de su colonia en búsquedas previas.

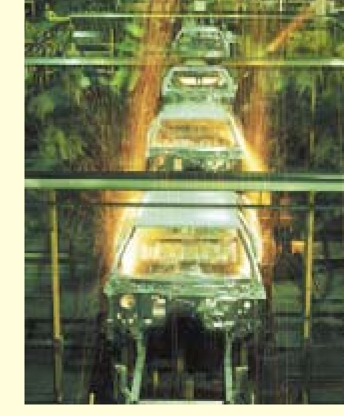
Las posibilidades de la inteligencia de enjambre son, pues, enormes. Ofrece nuevos métodos para el diseño de sistemas que requerían control centralizado y extensa programación previa. La inteligencia de enjambre puede ostentar en cambio autonomía y sibisuficiencia, basándose en interacciones directas o indirectas entre agentes individuales. Tales operaciones podrían desembocar en sistemas capaces de adaptarse a condiciones fluctuantes.

Se trata, de todos modos, de una especialidad todavía en la infancia. Dado que los investigadores no poseen una comprensión detallada del funcionamiento interno de los enjambres de insectos, la identificación de las reglas mediante las que interactúan los individuos ha constituido un gran problema; sin tal conocimiento, los informáticos se las ven y se las desean para desarrollar programas idóneos. Además, aunque los métodos basados en la inteligencia de enjambre han demostrado su eficacia en problemas de optimización y control, los sistemas desarrollados han sido de carácter reactivo, carentes de la necesaria perspectiva general para resolver problemas que exijan técnicas de razonamiento en profundidad. Se puede objetar, además, que la utilización de ciberagentes insectomorfos autónomos desembocará en conductas impredictibles en los ordenadores en que moran. Característica que, por otra parte, podría resultar positiva, pues permitiría a tales sistemas adaptarse por sí solos para afrontar problemas nuevos e imprevisibles, flexibilidad de la que los programas tradicionales suelen carecer.

Se supone que no se tardará mucho en insertar microchips en millares de objetos cotidianos. La capacitación de estas laminillas de silicio para lograr que se comuniquen entre sí va a exigir nuevos enfoques. Con palabras de Kevin Kelly: "Piezas tontas, debidamente conectadas en enjambre, producen resultados inteligentes". La clave reside en la debida interconexión de las partes.

Con la laboriosidad de la abeja





6. LAS ABEJAS (*arriba*) realizan tareas dependientes de las necesidades de la colmena. Se espera que el estudio de la forma en que estas tareas son asignadas permita desarrollar métodos más eficaces de programar los equipos de una factoría automatizada (*abajo*).

En las colmenas, las abejas se especializan en ciertas tareas según la edad. Cumple a las mayores explorar fuentes de alimento. Pero la distribución de tareas no es rígida: cuando el alimento escasea, también las jóvenes serán forrajeras.

Con tal sistema biológico por modelo, hemos trabajado con Michael Campos para idear una técnica de planificación de la pintura en una fábrica de camiones. En la factoría, las cámaras de pintura reciben camiones procedentes de una cadena de montaje. Cada cámara es como una abeja artificial especializada en un color. Las cámaras pueden cambiar de color en caso necesario, pero ello cuesta tiempo y dinero.

Dado que se ignora todavía la forma exacta en que las abejas regulan el reparto de tareas, hemos adoptado la hipótesis siguiente: un individuo realiza las tareas para las que está especializado, a menos que apremie la exigencia de cumplir otra función. Así, una cámara de pintura de rojo seguirá encargada de ese color, a menos que un trabajo urgente exija pintar un camión de blanco y las demás cámaras, y en particular, las especializadas en blanco, tengan largas colas de espera.

Por simple que parezca semejante regla, es harto eficaz. De hecho, un sistema inspirado en las colmenas permite que las cámaras de pintura establezcan sus propios programas de trabajo con mayor eficiencia —con menor número de cambios de color— de lo que puede lograr un ordenador central. Gracias a ese método, se responde a la variación de la demanda. Si aumenta de repente el número de camiones que es necesario pintar de azul, otras cámaras pueden abandonar los colores en que están especializadas para atender a los vehículos no asignados. Además, tal sistema se recupera con presteza en caso de avería. Si una cámara de pintado queda fuera de servicio, otras estaciones compensan el fallo, repartiéndose de inmediato la carga adicional.

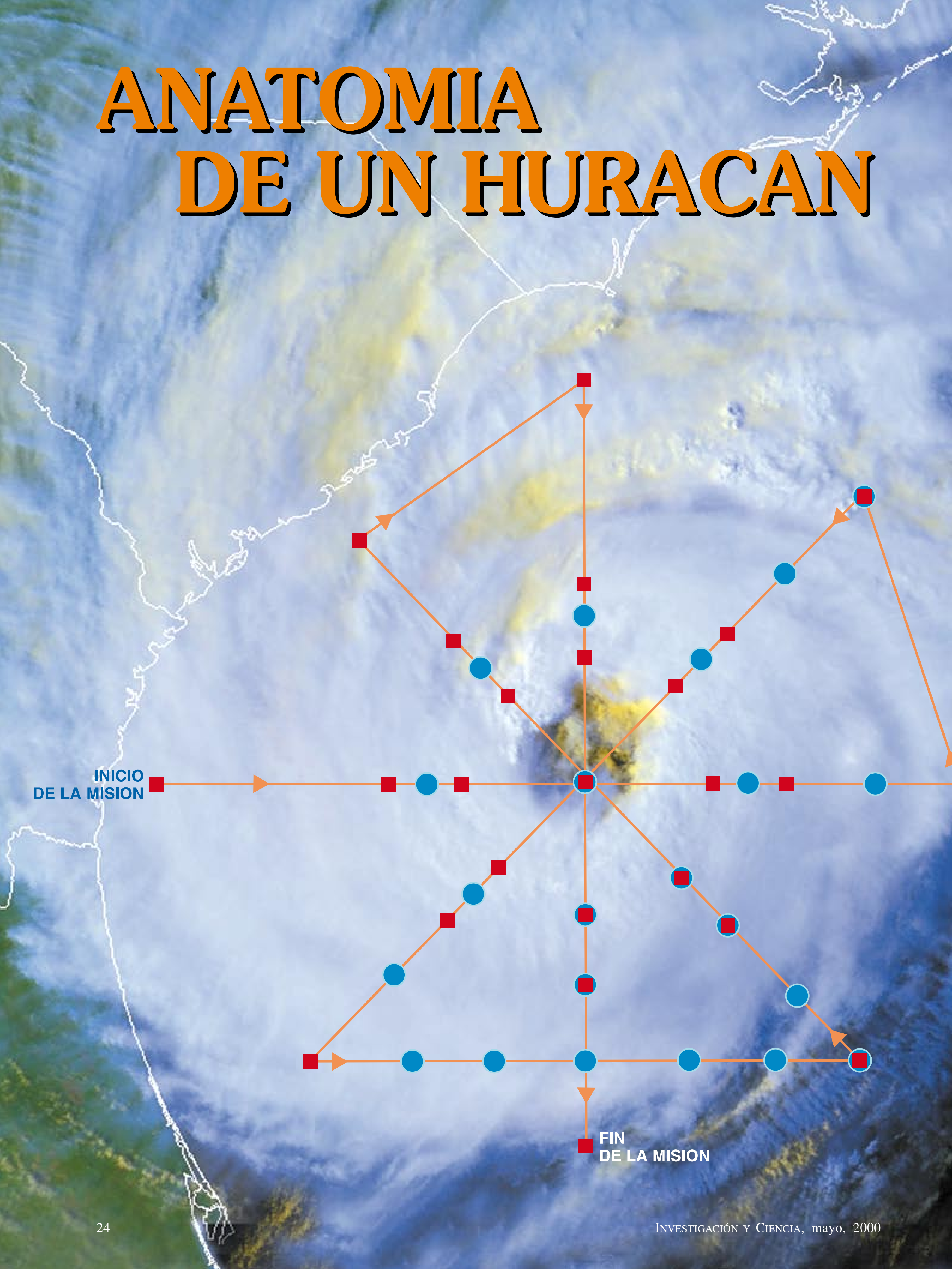
—E.B. y G.T.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SWARM INTELLIGENCE: FROM NATURAL TO ARTIFICIAL SYSTEMS. Eric Bonabeau, Marco Dorigo y Guy Théraulaz. Oxford University Press. 1999.

Puede hallarse más información sobre optimización de base fórmica, en la Malla Máxima Mundial, en iridia.ulb.ac.be/dorigo/ACO/ACO. html.

ANATOMIA DE UN HURACAN





Tim Beardsley
Fotografías de Andrew Itkoff, Silver Image

Base McDill de la Fuerza Aérea, en Florida, 29 de agosto de 1999, 13:52 hora local. Terminada la charla sobre seguridad, todos tienen abrochados los cinturones en el interior del avión, un cuatrimotor turbohélice WP3D. El aparato, abarrotado de ordenadores, cuatro radares diferentes y múltiples instrumentos más, echa a andar por la pista. Las horas precedentes habían sido una metáfora del huracán: un viaje organizado a toda prisa, un vuelo a las seis de la mañana desde Baltimore y, después, sesiones de información con la tripulación, intercaladas entre aceleradas explicaciones de Frank W. Marks, jefe del grupo de científicos a bordo.

Nuestro destino es un huracán real, el Dennis. Localizado a 290 kilómetros al este de Jacksonville, se halla en pleno giro sobre sí mismo y alimenta vientos de 145 kilómetros por hora. Amenaza ambas Carolinas. En tierra, atemorizados veraneantes y residentes de las islas de barrera de Carolina del Norte aseguran las ventanas, cargan las maletas en los coches y huyen del huracán que se avecina. Pero Marks y su equipo de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) miran a Dennis con esperanza, sin temor. Si nuestro vuelo a través de sus brazos curvos se desarrolla de acuerdo con lo previsto, la perturbación arrojará luz sobre un misterio central de los huracanes y tifones: el agente determinante de que ese meteoro aumente su furia o se calme hasta convertirse en una inofensiva zona de baja presión. ¿Es ese agente el océano situado a sus pies o son los vientos superiores?

Marks se cuenta entre los defensores de la tesis oceánica. El mar controlaría la evolución de los huracanes mediante la adición o la extracción de energía en forma de calor. Por contra, los modelos de predicción actuales consideran al océano mero observador pasivo.

Estos modelos han fracasado de manera estrepitosa al predecir el empeoramiento de las borrascas. El huracán Andrew sorprendió a los meteorólogos en 1992 cuando se intensificó de repente a su paso sobre las cálidas aguas de la corriente del Golfo; mató luego a 15 personas y causó daños por valor de 25.000 millones de dólares en el sur de Florida. Tres años más tarde, en el golfo de México, el huracán Opal se transformó —la misma noche en que el telediario de las 23 horas asegurara a los residentes de la costa del Golfo que no había motivo de alarma— de una categoría 2 en una terrorífica categoría 4, de gran potencial devastador. También el Opal acababa de pasar sobre un remolino de aguas cálidas profundas. Aunque el temporal perdió fuerza poco antes de alcanzar la costa, causó en total más de 28 bajas. Y a principios de 1999, el huracán Bret siguió lo que ahora empieza a parecer una secuencia habitual, ascendiendo de categoría 2 a categoría 4 tras su recorrido por aguas cálidas. Afortunadamente, abordó la costa sobre una zona poco poblada de tierras de labor en Texas.

Si Marks y sus colaboradores andan en lo cierto, analizando en detalle el núcleo de un huracán podrán deshilar la madeja revuelta de factores que determinan el nacimiento, desarrollo y muerte de una borrasca. Necesitarán conocer la temperatura del mar a diferentes profundidades durante el paso del huracán. También querrán obtener la máxima información acerca de sus vientos y oleaje.

Dennis, ahora un vigoroso huracán de categoría 2, posee el mismo ominoso potencial de rápida intensificación que tuvieron Andrew y Opal. Cuando el huracán Bonnia cruzó la corriente del Golfo en 1998 —sin intensificarse— Marks se sintió desolado ante la falta de medios instrumentales para su estudio. Pero mientras seguía la trayectoria de Dennis a fines de agosto, cayó en la cuenta de que se le presentaba la

1. EN EL PROYECTO de la misión de investigación del interior del huracán Dennis el 29 de agosto de 1999, había que atravesar el huracán desde múltiples frentes para medir la interacción entre el viento y las olas. La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los EE.UU. cedió un avión de investigación WP3D a la arriesgada expedición porque Dennis amenazaba con intensificarse peligrosamente. La ruta real se desvió un poco de la proyectada. Los cuadros rojos indican los puntos donde la tripulación dejó caer sondas del sistema de determinación global de posición (GPS) para medir los vientos; los círculos azules simbolizan disparos de batitermógrafos aerotransportados desechables (AXBT), que miden la temperatura del océano.





2. CARGA DE LOS AXBT en los tubos de disparo. Unos explosivos lanzarán las sondas durante el vuelo lejos del avión. El técnico responsable fue James Barr.

ocasión. Existían los medios y, para mayor ventura, Eric d'Asaro, de la Universidad de Washington, acababa de soltar tres boyas, de técnica avanzada, según una línea este-oeste que cortaba la trayectoria de Dennis. Las boyas subían y bajaban, para registrar la temperatura y la salinidad de la capa de mezcla, entre la superficie del mar y una profundidad de unos 200 metros. Estos datos podían completar las observaciones hechas desde nuestro avión. Marks apremió a su gente para que iniciaran el examen minucioso de Dennis, que era el motivo por el que nos encontrábamos en la cabina.

Nuestro grupo tenía que examinar la depresión de dentro hacia fuera, introduciendo en su interior sondas en caída libre, tomando su temperatura y calculando la fuerza del viento. En los días precedentes, el reactor *Gulfstream IV* de la NOAA había cartografiado las condiciones atmosféricas en diferentes alturas de la región. Nuestro vuelo iba a culminar la exploración: atravesar cuatro veces en línea recta el ojo del huracán.

Marks ha soportado docenas de vuelos corrientes a través de huracanes. Bromeando, asegura que la parte más peligrosa de una misión es el trayecto hasta el aeropuerto. Pero sabe muy bien que los pilotos han de enfrentarse a amenazas reales, sobre todo en la vecindad de los bancos macizos de cumulonimbos que forman la pared del ojo. Los vientos cambian allí de velocidad y dirección de manera imprevisible, y estos vórtices semejantes a tornados pueden aparecer sin aviso alguno. Hace diez años, Marks iba volando en un avión gemelo, a través del huracán Hugo, que ascendía a la categoría 5. Se paró un motor mientras la nave volaba a baja altura dentro del ojo; faltó poco para que un vórtice arrojara el avión al mar. "Vivo de milagro", recuerda Marks.

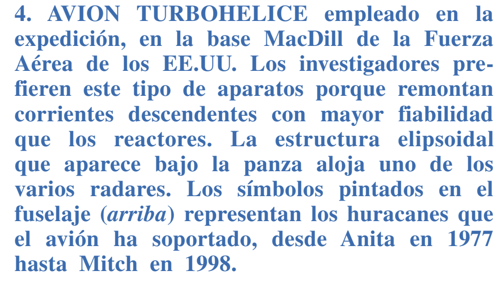
Por la mañana, en la sesión informativa previa al despegue, la tripulación no mostraba ningún signo de preocupación. Los más experimentados portaban en su mono azul distintivos que recuerdan el número de veces que han atravesado el ojo de un hu-





3. LAS NUBES DE LLUVIA se apilan cerca de la pared del ojo del huracán. El tránsito hasta interior del ojo es la parte más arriesgada del vuelo, porque los vientos pueden cambiar de dirección y velocidad imprevisiblemente. Dentro del ojo, reina absoluta calma.





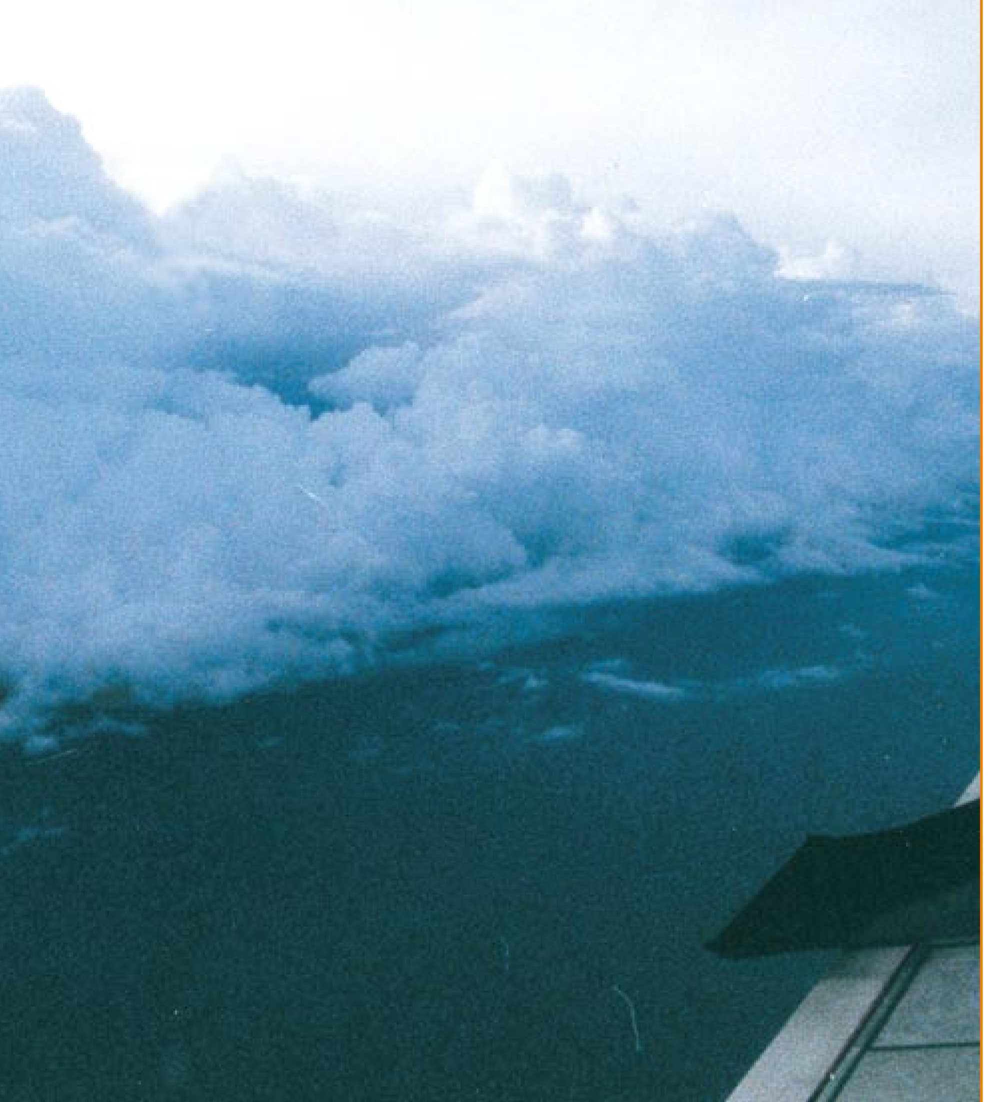
4. AVION TURBOHELICE empleado en la expedición, en la base MacDill de la Fuerza Aérea de los EE.UU. Los investigadores prefieren este tipo de aparatos porque remontan corrientes descendentes con mayor fiabilidad que los reactores. La estructura elipsoidal que aparece bajo la panza aloja uno de los varios radares. Los símbolos pintados en el fuselaje (*arriba*) representan los huracanes que el avión ha soportado, desde Anita en 1977 hasta Mitch en 1998.

racán. A medida que avanzamos a lo largo de la costa oriental de Florida, el mecánico de vuelo parece, sin embargo, disfrutar repitiéndome que los huracanes cambian de carácter en pocas horas. Nuestro vuelo duraría nueve o más. Parece importante contar el número de personas a bordo: 19, entre científicos (seis), observadores, técnicos de instrumentación y tripulación.

La fragilidad del complicado equipo que llevamos se pone bruscamente de manifiesto cuando el técnico James Barr anuncia que el radar Doppler de la cola del avión no está transmitiendo datos inteligibles. Este aparato, junto con un segundo radar instalado en la panza del fuselaje, determina las velocidades del viento siempre que esté lloviendo. Pero Marks señala que necesitamos esa información. El director del vuelo aprueba la demora y volamos en círculo mientras Barr y Terry Lynch, experto en electrónica, se afanan en la reparación. Extraen las bandejas de instrumentos y reemplazan un transmisor.

Pasan diez minutos. Lynch masculla algo entre dientes, preocupado. Tras algunos tensos minutos más, hace el signo de la victoria. Todo el mundo vuelve a su trabajo.

Empieza la misión propiamente dicha. Nos hallamos frente a la costa y a unos pocos kilómetros al norte de la linde entre Florida y Georgia. Richard McNamara, ingeniero electricista, toma una radiosonda de descenso dotada de un sistema





5. FRANK D. MARKS (*primer plano*) encabezaba el grupo de científicos. Aquí aparece con el copiloto Dave Rathbun al comienzo de la misión. Marks sostiene que los meteorólogos han subestimado en su mayoría el papel de los océanos en los huracanes.

de determinación global de posición (GPS). Está envuelta en plástico metalizado. Cuando la suelte en medio del huracán, abrirá un paracaídas a poco de iniciar su caída libre y transmitirá su posición a la cabina. McNamara la programa conectándola a su tablero de instrumentos durante unos instantes, la desconecta y la introduce en un tubo transparente de lanzamiento situado en el suelo. El director de vuelo pronuncia el "3, 2, 1" de rigor y McNamara oprime un botón. La presión del aire en la cabina expulsa del fuselaje el cilindro, de un metro de largo, con un fuerte sonido sibilante. McNamara confirma el tiempo.

En cuestión de segundos, su estación informatizada ha captado una señal: se ha abierto el paracaídas. Sigue la trayectoria de la sonda mientras Dennis la aleja del avión; indica la dirección y la fuerza de los vientos a lo largo de su caída al océano. McNamara repetirá esta secuencia en numerosas ocasiones, mientras va creando poco a poco una representación tridimensional de la borrasca.

Avanzamos rumbo este a 4300 metros. Nadie bromea ya. Se palpa una excitación creciente. Conforme nos alejamos de la costa y se elevan ante nosotros nubes ingentes de un gris oscuro, la tripulación pulsa los mandos que controlan una gavilla de instrumentos preparados para un análisis exhaustivo del huracán.

A las 15:15 horas, Ron Phillipsborn, piloto de temple donde los haya, anuncia por el interfono que nos acercamos a un temporal. Desde las ventanillas vemos el diluvio que cae. El azul del cielo se ha transformado en un blanco lechoso. Desde que alcanzamos la altura de crucero, siempre andaba uno u otro por el pasillo, pero ahora nadie se mueve del asiento, abrochados los cinturones.

El avión, sin embargo, apenas se inmuta. No tarda en reanimarse el pasillo. La configuración espiral que aparece en la pantalla del radar, familiar para quienes consultan el parte meteorológico, resulta en estas circunstancias mucho más impresionante. Los operadores compilan los mapas cada 30 minutos y los mandan, vía satélite, al Centro Nacional de Huracanes de la Universidad Internacional de Florida en Miami. Christopher W. Landsea, del grupo de científicos, ordena con presteza los datos en una consola y estima que el ojo de Dennis mide 80 kilómetros de diámetro, más que la mayoría de los huracanes. El meteoro avanza lentamente hacia el norte, barriendo la costa. Sus olas se estrellan contra los muelles y sus vientos arrancan los tejados.

En cuanto alcanzamos el punto desde donde lanzar un batitermógrafo aerotransportado desechable, o AXBT (de *Airborne Expendable Bathytermograph*), McNamara oprime un interruptor de la consola. Una carga explosiva dispara el primero de los AXBT, que están precargados en la panza del avión, contra el huracán que ahora nos envuelve. Los AXBT se mantienen silentes en caída, pero al chocar con el océano lanzan un termómetro adosado a un cable de 300 metros y transmiten la temperatura a lo largo del recorrido.

Nos acercamos a la pared del ojo a unos 500 kilómetros por hora. Vamos soltando sondas GPS y AXBT. En algún instante, por los resquicios entre nubes densas observo el océano enfurecido, bramando espuma.

Estas regiones de burbujas, que se forman cuando el viento bate las crestas de las olas, parecen nimiedades en comparación con los kilómetros cúbicos de aire y agua que se agitan a nuestro derredor. Ello no impide que los científicos les atribuyan un posible papel crucial en la evolución del huracán, porque realizan eficazmente el intercambio de energía entre el mar y el aire. A nuestro radiómetro corresponde medir esa espuma a través de la energía en microondas que se refleja de la superficie del mar en seis frecuencias diferentes. O puede hacerlo en principio, al menos. En la práctica, los problemas informáticos han impedido hasta ahora el funcionamiento del instrumento en vuelos anteriores. Marks confía en que Peter Black, adscrito a la NOAA, que se ha quedado en Florida, haya arreglado por fin el programa.

El fuselaje tiembla y se encabrita de nuevo. Phillipsborn ordena de nuevo volver a los asientos. Pero suelo y respaldos son ahora blancos móviles. Soportamos un par de bandazos inquietantes. ¿Cuánto más resistirán los alerones sin romperse? McNamara, al otro lado del pasillo, sigue impasible, lanzando sus sondas GPS alternadas con alguna que otra AXBT. Parece demasiado ocupado para especulaciones ociosas.

De repente, cesan las sacudidas. Hemos penetrado en el ojo de Dennis. Sobre nosotros, el cielo azul que habíamos dejado atrás. La velocidad del viento fuera de la cabina es de tres nudos, ni siquiera suficiente para agitar una bandera. Tratamos de localizar el punto donde la velocidad del viento y la presión son mínimas a fin de situar el centro. No muchos kilómetros más allá se apilan nubes ingentes, distribuidas en un arco inmenso. Nos adentramos en la pared oriental del ojo; soltamos más sondas en las entrañas de aquella colosal máquina térmica que gira en torno a nuestro avión.



6. SONDA DE SISTEMA DE DETERMINACION GLOBAL DE LA POSICION, preparada para el lanzamiento por Richard McNamara, ingeniero eléctrico del grupo. La presión del aire en cabina impulsa los instrumentos a través de un tubo montado en el suelo. Una vez fuera del avión, las sondas despliegan un paracaídas y transmiten datos sobre la posición por donde las transportan los vientos hasta que caen al mar.

Las horas van transcurriendo mientras describimos una rosa de los vientos centrada en el ojo. Ha caído la tarde, y aunque con la tensión se me había ido el apetito, me dirijo a la cocina en busca de un emparedado. Allí encuentro a un miembro de la tripulación leyendo tranquilamente el periódico.

Las bajadas bruscas, imprevisibles, se hacen familiares, pero empeoran en un lento tramo viento arriba. El radar Doppler reparado no acaba de funcionar bien: la cosecha será menos pródiga de lo que Marks hubiera querido. Landsea comunica que los instrumentos registran vientos en superficie de unos 160 kilómetros por hora. Dennis se están envalentonando. Al intensificarse agita hacia arriba las aguas frías de las profundidades. Supe más tarde que el huracán había enfriado tres grados las aguas allende la plataforma de Georgia y Carolina del Sur y casi doblado la profundidad de la capa de mezcla debajo de su núcleo. Ese efecto, a su vez, amainó la furia del huracán Floyd cuando recorrió el mismo camino días después.

Transmitimos las lecturas del radiómetro al Centro Nacional de Huracanes. Pero Marks no acaba de confíar todavía en el aparato. Y se muestra sorprendido cuando el operador de radio del avión le pasa una llamada de Black. Debe de ser urgente, porque la radio interfiere con los radares; Marks imagina, pues, que le van a informar sobre un nuevo fallo en el radiómetro. Pero, no. Black le comunica entusiasmado que el instrumento, preparado para revelar con exactitud los vientos de superficie, funciona a la perfección. Marks, tranquilo al fin, anuncia la buena nueva. El estado general de ánimo mejora a ojos vistas.

El vuelo continúa. Sobrevolamos las boyas de D'Asaro, dejando caer AXBT y sondas GPS, mientras la blancura exterior va transformándose en noche negra. Entramos por cuarta vez en el ojo y buscamos el centro, para ver cuánto se ha movido: la posición del centro constituye una información decisiva para ayudar a los meteorólogos en su previsión del rumbo del mismo. El costado occidental de Dennis se halla sobre la corriente del Golfo, donde presumiblemente está absorbiendo energía, pero el ojo sigue lejos en pleno Atlántico. Marks teme que penetre al día siguiente en las costas de Carolina del Norte.

De retorno a casa lanzamos algunas sondas AXBT y GPS lo más cerca posible de las estaciones de medida en tierra y boyas, para que los científicos puedan realizar comparaciones sobre el funcionamiento de los instrumentos. Aterrizamos en la base McDill a las 22:24 horas. Marks rezuma satisfacción por el trabajo realizado; no parece haberle agotado la tensa jornada de casi nueve horas.

Al levantarnos al día siguiente, nos enteramos con alivio de que Dennis se ha desviado un tanto hacia el este, avanzando paralelamente a la corriente del Golfo. La agitación que enfrió la superficie del mar, unida al hecho de que Dennis no cruzara la corriente del

Golfo, indica que no se convertirá en la pesadilla que habíamos temido. Antes bien, nos ha ofrecido un tesoro repleto de información.

Verdad es que los datos del radiómetro constituyen el premio principal. Pero la feliz conjunción del vuelo de nuestro avión y las boyas de D'Asaro han aportado un filón científico en otros aspectos. Habíamos lanzado 30 sondas GPS, varias de ellas en la misma pared del ojo. Habíamos disparado otras 15 AXBT, tres de las cuales cayeron sobre la línea este-oeste al sur del ojo donde operaban las boyas de D'Asaro. De los datos del radar Doppler pueden sacar partido la mayoría de las aplicaciones. Además, Ed Walsh, de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio, empleó con éxito un altímetro radar de exploración durante el vuelo; logró así un número sustancial de mediciones de la dirección y altura de las olas del huracán. Con un grado notable de asimetría, se parecen a una configuración que Walsh había visto antes en otro huracán, el Bonnie.

Toda esta información será triturada en los molinos de los especialistas en huracanes a lo largo de los próximos años. Ningún huracán podría, por sí solo, satisfacer todas las cuestiones planteadas sobre la evolución de tales meteoros. Pero Marks y su equipo nos han enseñado que pueden desplegar un conjunto amplio de instrumentos de técnica depurada en las mismas entrañas de un peligroso ciclón y obtener resultados valiosos. Mientras gente como él y los suyos no duden en montarse a lomos de ciclones, arriesgando la propia vida, no cabe duda de que acabará por revelarse el misterio de la intensificación de los huracanes y saberse de antemano la posibilidad de que la borrasca se transforme en asesina.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THERMODYNAMIC CONTROL OF HURRICANE INTENSITY. Kerry A. Emanuel en *Nature*, vol. 401, págs. 645-669; 14 de octubre, 1999.

La página de huracanes de la NOAA es accesible en hurricanes.noaa.gov/

Se puede hallar un resumen de la misión del huracán Dennis en www.aoml.noaa.gov/hrd/Storm_pages/dennis99/990829I.html

El atlas de depresiones de la División de Huracanes de la NOAA se puede consultar en www.aoml.noaa.gov/hrd/Storm_pages/frame.html

PERFILES

George Musser

ANDRES DUANY, abanderado del Nuevo Urbanismo

Eran las nueve y media de una noche de noviembre cuando el más acérrimo crítico de los barrios suburbanos decidió cruzar la calle. Andrés Duany acababa de inaugurar una conferencia de urbanistas, de una semana de duración, en Huntersville (Carolina del Norte), y salimos a cenar. El primer sitio en el que probamos estaba cerrado. Aparcamos el coche y emprendimos la búsqueda de otro. ¿En qué estaríamos pensando? Tras pasar de largo junto a una gasolinera, atravesar un seto, trotar por un terraplén, brincar sobre los charcos y atravesar a todo correr una calzada de cuatro carriles, acabamos en un tramo aislado de acera junto a un cajero automático. “A veces me olvido de dónde estoy. Parecen todos iguales.”

Duany vino a este suburbio de Charlotte, una de las ciudades norteamericanas que más rápido crecen, para ayudar a poner orden entre tanto desbarajuste. El y su mujer, Elizabeth Plater-Zyberk, están levantando por todo el país unas amalgamas de pueblo y ciudad: barriadas atrayentes para los peatones en vez de bloques y descampados. Cuando se habla de “crecimiento inteligente” se está aludiendo a su modo de ver el desarrollo urbano. Pero, ¿se logra también su objetivo de integrar el tejido social? Duany sostiene que la arquitectura no debería mirar sólo al individuo, como sucede con frecuencia, sino constituir un punto de encuentro para fortalecer la comunidad. “El éxito no consiste en decir: ‘Mi casa tiene mejor gusto’, sino ‘Mi hija tiene más amigas que antes’.” Según estos criterios, sin embargo, su éxito está en el alero.

Nacido en Nueva York en 1949, Duany creció en Cuba en el seno de una familia de constructores. Se marchó con la llegada de la revolución castrista. Conoció a Plater-Zyberk en la Universidad de Princeton. Juntos ya se fueron a la de Yale, a principios de los setenta, atraídos por la fama de Vincent J. Scully, brillante historiador de la arquitectura. Desde 1976 hasta 1980 proyectaron grandes bloques de apartamentos en una pujante empresa de Miami. Allí encontró la luz, que Duany atribuye a una serie de charlas de Léon Krier, un urbanista teórico de Luxemburgo. Con Robert S. Davis, un constructor local idealista, la pareja recorrió las aldeas del sur en un Pontiac descapotable, recogiendo ideas para una pequeña ciudad que construirían ellos mismos. El resultado fue Seaside, una colonia de chalets de ornamentación recargada cerca de Panama City (Florida), que pronto se convirtió en la meca donde acudían arquitectos y urbanistas. Así comenzó el movimiento del Nuevo Urbanismo. Hoy las urbanizaciones neotradicionales suman ya 124, de las cuales 31 fueron diseñadas por la empresa de esta pareja. Plater-Zyberk es ahora decana de la escuela de arquitectura de la Universidad de Miami.



1. En la mayoría de los suburbios no se puede comprar leche sin coger el coche, dice Andrés Duany, urbanista partidario de las zonas peatonales

“Hay gente a la que le gusta vivir en las afueras, sin urbanizar, de las ciudades”, explica Duany. Esos enclaves, después de todo, proporcionan una calidad de vida que en las ciudades sólo los ricos pueden permitirse. “El problema es que a los que no les gusta no se les ofrece alternativa.” Para éstos, los Nuevos Urbanistas han resucitado los principios que regían la planificación urbana antes de 1945, en particular, la integración de viviendas, comercios, oficinas y edificios públicos, que las calificaciones urbanísticas de la posguerra separaron rígidamente. En los proyectos del Nuevo Urbanismo, ninguna casa se encuentra a más de cinco minutos a pie del centro comercial, con cafeterías, paradas de autobús y otros servicios. En esos aledaños urbanos se mezclan además diferentes tipos de edificios (apartamentos, pisos, casas con jardín) y por tanto diferentes niveles de ingresos y grupos de edades. El trazado segregado de tales cinturones, argumenta Duany, es el origen de quejas vecinales de falta de espacios comunitarios y la esclavitud del volante.

El y Plater-Zyberk son célebres también por prestar atención a los pequeños detalles: los garajes y los aparcamientos quedan escondidos tras los edificios, las esquinas agudas de las calles impiden la velocidad excesiva, al tiempo que las líneas de visión convergen hacia edificios importantes o en panorámicas de interés. Un diseño esmerado compensa la mayor densidad de edificación. En los barrios al uso, dice Duany, los edificios, los pequeños jardines de las casas y las calles no guardan orden ni concierto. Cualquier solución se da por buena.

He venido a Huntersville a ver el aspecto menos divulgado del Nuevo

Urbanismo, la construcción de algo tan sutil como el acuerdo. Rodeado de media docena de arquitectos bisoños y utópicos, Duany transforma durante una semana la sala de plenos del ayuntamiento en un estudio. Flexos, pliegos y rollos blancos: no falta nada; ni el soniquete de los sacapuntas. Cada día vienen ingenieros de los servicios públicos, jardineros o jefes de bomberos. Por la tarde, Duany presenta el plan postrero en sesión pública. La comunidad aprovecha así la oportunidad de tomar parte en su futuro y de comprobar si las prácticas de Duany plantean en justos términos sus problemas vecinales y los soluciona.

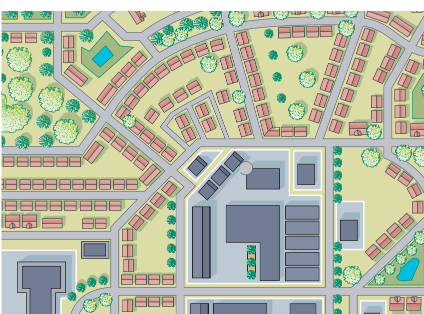
En Huntersville la tarea es más fácil que en otros sitios. La ciudad, cuya población ha pasado de 3000 a 26.000 habitantes en un decenio, abolió sus tradicionales calificaciones parcelarias y adoptó las reglas del Nuevo Urbanismo en 1996. Ahora la comunidad, codo con codo con promotores privados, quiere restaurar una fábrica textil centenaria, abandonada. Con su parcela de 15 hectáreas ocupa el centro y por ella pasa una vía férrea que se destinará a transporte de pasajeros.

Duany sabe salir airoso de otros retos en lugares menos acogedores. A los promotores y banqueros, recelosos ante cualquier desviación de las fórmulas establecidas, les habla de las ganancias de sus proyectos y del horizonte que se le abre al sector de la construcción. “El Nuevo Urbanismo sacará a la construcción de su crisis”, proclama. A los vecinos y los pequeños comerciantes, desconfiados de todas las promesas y buenas palabras, les habla de asegurar que el crecimiento mejore, y no que arruine, la comunidad (por no hablar del valor de sus solares). “La elección no consiste en si viene o no más gente de fuera, sino cuánta superficie consumirá.”

A los alcaldes y políticos les habla de cómo su proyecto, que incorpora el transporte público desde el comienzo, será un modelo para la nación. “En Carolina del Norte hay amplitud de miras. Siempre me ha resultado más fácil trabajar aquí.” Duany nunca se arredra ante las dificultades; al contrario, intenta que todos conspiren con él: “La gran jugada aquí es que este proyecto le da buena reputación a la densidad, de manera que Charlotte no sea como Atlanta, donde la gente de lo único que habla es del tráfico.”

Duany se convierte, sin proponérselo, en el centro de cualquier conversación. Su perfecta compostura le hace a uno parecer desgarbado. A veces, sin embargo, abusa de su don de gentes y celebridad. En cierta reunión municipal, un representante de los ferrocarriles Norfolk Southern rebatió su propuesta de adaptar la vía férrea a un tren ligero de cercanías, en tanto que el empresario pretendía un servicio rápido de transporte hasta el centro de Charlotte. La disputa no era meramente semántica. El ferroviario buscaba una amplia servidumbre de paso, que podría aislar el proyecto y dejar Huntersville sin un centro coherente.

Duany de repente se levantó, se dirigió a uno de sus asistentes y volvió con un trozo de papel de calco con dos líneas paralelas separadas pocos centímetros. Era un dibujo a escala de la servidumbre de paso que pretendía el ferroviario. Los dos se inclinaron sobre el plano y desplazaron el papel de calco hasta encajar las líneas. En pequeñas negociaciones como ésta, el Nuevo Urbanismo se adapta a las condiciones locales y gana experiencia para futuros proyectos.

2. El paisaje urbano de las barriadas consiste frecuentemente en subdivisiones de zonas comerciales, parques públicos y viviendas (izquierda)*, mientras que el Nuevo Urbanismo combina tiendas, oficinas y hogares* (derecha)

Terminada la sesión de presentación vespertina, entramos en un cine para ver *American Beauty*, que los críticos alaban por su denuncia de la alienación de los suburbios. Por mucho que su encanto y talante negociador le lleven al éxito con frecuencia, insiste en que se está cansando de todo. Piensa dedicar más tiempo a enseñar y a escribir, a difundir sus ideas sobre urbanismo y comunidad entre el gran público. Pero si su energía se apaga, no lo muestra en sus vehementes respuestas a los críticos, garrapateadas en un ordenador de mano Psion en los intersticios de la reunión.

Los ecologistas escépticos quieren que los Nuevos Urbanistas la emprendan con ciudades y suburbios decrépitos, en vez de confabularse con los promotores para devorar más terreno. Pero Duany insiste en que él sólo es pragmático. Aunque las ideas del Nuevo Urbanismo son también necesarias en áreas metropolitanas, generalmente se materializan en terrenos baldíos porque es allí donde se construye.

Hay una crítica que no es tan fácil de refutar. La misma popularidad de las construcciones del Nuevo Urbanismo hace subir los precios y mina uno de los objetivos propuestos por Duany: la diversidad. La casa más barata de Seaside es un chalet de 110 metros cuadrados que cuesta 510.000 dólares. Sus propios empleados confiesan que no podrían pagarse las viviendas que proyectan. Es un tema con el que Duany dice que lucha. Un diseño de la casa artificialmente modesto —por ejemplo, hacer más pequeños los cuartos de baño— mantiene los precios bajos. “Para abaratarla, tendrá que perder en confort”, admite.

Antes de dejar el cine, prestamos disimulada atención a lo que comenta un pandilla de adolescentes que remolonean en el vestíbulo. “Necesito entender mejor a los jóvenes”, me confía. Interesante, porque casi todo lo que hace parece dirigido a ellos. ¿Cómo responderán éstos al Nuevo Urbanismo? ¿Querrán los jóvenes de Huntersville asentarse en su ciudad?, ¿serán capaces de pagárselo? Pasará una generación antes de que sepamos si el Nuevo Urbanismo representa una diferencia en el modo en que la gente vive y se relaciona. Basta con un niño para empezar una ciudad.

Endozoocoria

Interacción ecológica y evolutiva

Por etimología, el cultismo endozoocoria designa el proceso de dispersión de las semillas mediante frugívoros. En esa interacción mutualista, el animal ofrece a la planta la probabilidad de supervivencia, en su propio medio o en otro nuevo.

Mirlos, currucas, petirrojos y otras aves frugívoras resultan eficaces sembradores de especies de frutos carnosos. No sólo por la cuantía de semillas, sino también por los lugares donde las depositan, aspecto éste que determina la probabilidad de supervivencia y desarrollo del vegetal. Pero si atendemos a la remoción de frutos por los agentes dispersantes, se observan importantes variaciones interanuales, que dependen del tamaño de las cosechas y la abundancia de frugívoros.

Una vez dispersada, la semilla queda expuesta a depredadores muy dispares. En primer lugar, a los herbívoros generalistas, vale decir, a los roedores, las hormigas, las chinches y los carábidos. Se trata de una fase caracterizada por una notable variación espacio-temporal de la tasa de depredación, que, según la especie, oscila entre porcentajes altísimos bajo la planta madre hasta exiguos, en campo abierto.

Anna Traveset, del CSIC de Baleares, ha demostrado que el efecto del tratamiento digestivo sobre la germinación de las semillas exhibe una gran variabilidad, en razón de las especies animales y vegetales involucradas. No puede afirmarse sin más que el tratamiento digestivo resulte beneficioso para la germinación. Aunque en la mayoría de los casos las semillas están sometidas al efecto gástrico de un solo dispersor, en ocasiones pueden sufrir una segunda digestión cuando otro animal depreda la especie frugívora.

Hemos encontrado un ejemplo paradigmático de tal dispersión indirecta en el islote canario de Alegranza. Allí una planta solanácea (*Lycium intricatum*) es manjar de un lagarto (*Gallotia atlantica*), depredado por un alcaudón (*Lanius excubitor*).

A diferencia de lo que ocurre en otras fases de la dispersión, donde predominan las interacciones mutualistas, el asentamiento final de las plántulas depende de la desecación y demás factores del medio. La probabilidad de supervivencia no es ajena al tipo de agente dispersante. Así, se ha observado que, en los cauces bajos de los barrancos de Canarias, donde lagartos (*Gallotia galloti*) y currucas (*Sylvia* spp.) dispersan las semillas del "Balo" (*Plocama pendula*), son los saurios los que incrementan la esperanza de vida de los ejemplares adultos frente a las violentas escorrentías. Los lagartos depositan, con mayor frecuencia, semillas al abrigo de grandes piedras que protegen a las plantas cuando se producen las intensas precipitaciones.



Hembra de Curruca capirotada (Sylvia atricapilla) *alimentando a su prole con bayas de tasaigo* (Rubia fruticosa)*, planta endémica de las islas macaronésicas. Foto: Nicolás Trujillo/Endemic-Foto*

Carlos M. Herrera y Pedro Jordano, de la Estación Biológica de Doñana, en sus trabajos sobre dispersión de semillas en ecosistemas mediterráneos, han señalado que el éxito del proceso dispersivo de una planta depende de los efectos de la actividad de los frugívoros en la diseminación y de los efectos del medio sobre la probabilidad de supervivencia de semillas y plántulas. Se advierte a menudo un desajuste entre ambos tipos de efectos; lo que ocurre en los últimos estadios del reclutamiento de semillas puede anular o contrarrestar los efectos positivos iniciales de la diseminación.

No puede hablarse, pues, de coevolución entre plantas y especies endozoócoras. En Palma de Mallorca, las martas (*Martes martes*), introducidas por el hombre, realizan una dispersión de semillas de *Cneorum tricoccon* muy eficaz; dígase lo propio de la interacción entre los lagartos endémicos de Canarias y especies vegetales introducidas y asilvestradas (cactáceas del género *Opuntia*, originarias de Centroamérica). En ningún caso, las especies implicadas han tenido una historia evolutiva común que modulara dicha interacción.

Los factores limitantes que dificultan la aparición de respuestas adaptativas en este tipo de relaciones se resumen en determinados procesos predispersivos, en la escasa especificidad de la interacción, en la amplia variabilidad en su resultado y en las distintas tasas evolutivas existentes entre plantas y animales dispersantes.

Factores que importan antes de la dispersión son la calidad de la polinización o el efecto negativo de especies que depredan la pulpa o semillas. Ambos limitan el tamaño de las cosechas y la calidad nutritiva de los frutos. Las plantas que producen grandes cosechas suelen presentar mayores tasas de visita y de consumo por parte de los frugívoros.

La baja especificidad de la interacción planta-frugívoro se hace explícita en cuanto advertimos que los frutos de una misma planta alimentan a especies muy dispares, cada una de las cuales, a su vez, utiliza una extensa variedad de especies de plantas.

Las tasas evolutivas de las plantas son mucho más lentas que las de los vertebrados, un fenómeno bien manifiesto en el caso de los laureles de Canarias (*Laurus azorica*) y los del área mediterránea (*Laurus nobilis*), cuyos frutos no han variado ni en tamaño ni en composición química, a pesar de su evolución independiente a lo largo de un prolongado período de tiempo bajo la presión de frugívoros distintos, palomas endémicas de Canarias en *L. azorica* y túrdidos en *L. nobilis*.

Así las cosas, prefiere hablarse, no de una coevolución estricta, sino de una "coevolución difusa". Se reconoce con ello que los ajustes ecológicos actuales pudieron haberse generado bajo el efecto interactivo de otros vertebrados hoy extintos o ausentes, reptiles sobre todo. En un estudio comparado, realizado por Jordano, entre características de frutos carnosos (tamaño del fruto y las semillas, cantidad de pulpa, tipos y composición de nutrientes) sólo se ha evidenciado la evolución correlacionada entre el tamaño del fruto y el tipo de frugívoro diseminador. Conclusión que hemos corroborado en Canarias al estudiar la interacción existente entre la orijama (*Neochamaelea pulverulenta*) y los lagartos endémicos del archipiélago (incluyendo especies extintas). El tamaño de las semillas de la planta en cada isla guarda relación con la talla de los lagartos que habitan, o habitaron, en cada una de ellas.

Por último, la posibilidad de ajustes evolutivos finos entre plantas y animales frugívoros será mínima si los factores abióticos que determinan una elevada mortalidad de semillas dispersadas y plántulas prevalecen sobre los efectos positivos derivados de la interacción con los frugívoros.

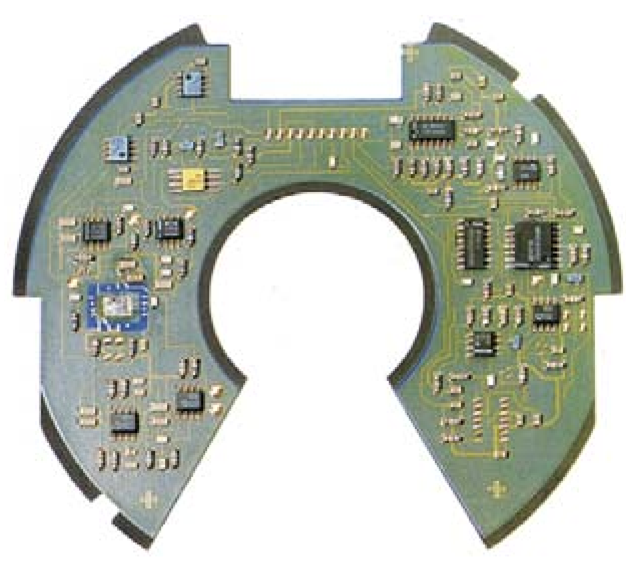
De estudios recientes de Herrera, Jordano y Eugene W. Schupp, de la Universidad de Utah, se desprende la necesidad de tomar en consideración los efectos inmediatos de la endozoocoria (cómo y dónde se depositan las semillas) y los efectos aplazados (probabilidad final de que una semilla dispersada por un animal frugívoro reclute igual que una planta adulta reproductiva), así como la interacción entre ambos.

MANUEL NOGALES HIDALGO
ALFREDO VALIDO AMADOR
Departamento de Biología Animal (Zoología)
Universidad de La Laguna, Tenerife

Microelectrónica

Substratos para potencia

En la fabricación de circuitos de potencia importa sobremanera la calidad y fiabilidad del diseño. Para aumentarlas, nada mejor que aplicar la técnica microelectrónica híbrida de capa gruesa (THCG), que consiste en disponer, mediante métodos serigráficos de alta resolución, distintos tipos de tintas (conductoras, resistivas y dieléctricas) para conformar un circuito electrónico. Se emplea en técnica aeroespacial, militar, de telecomunicaciones, industrial, de computadores, de automoción, de consumo, médica y otros.



1. Circuito multicapa, con conductores de plata, sobre sustrato de acero inoxidable. Se utiliza Heramic® de Heraeus

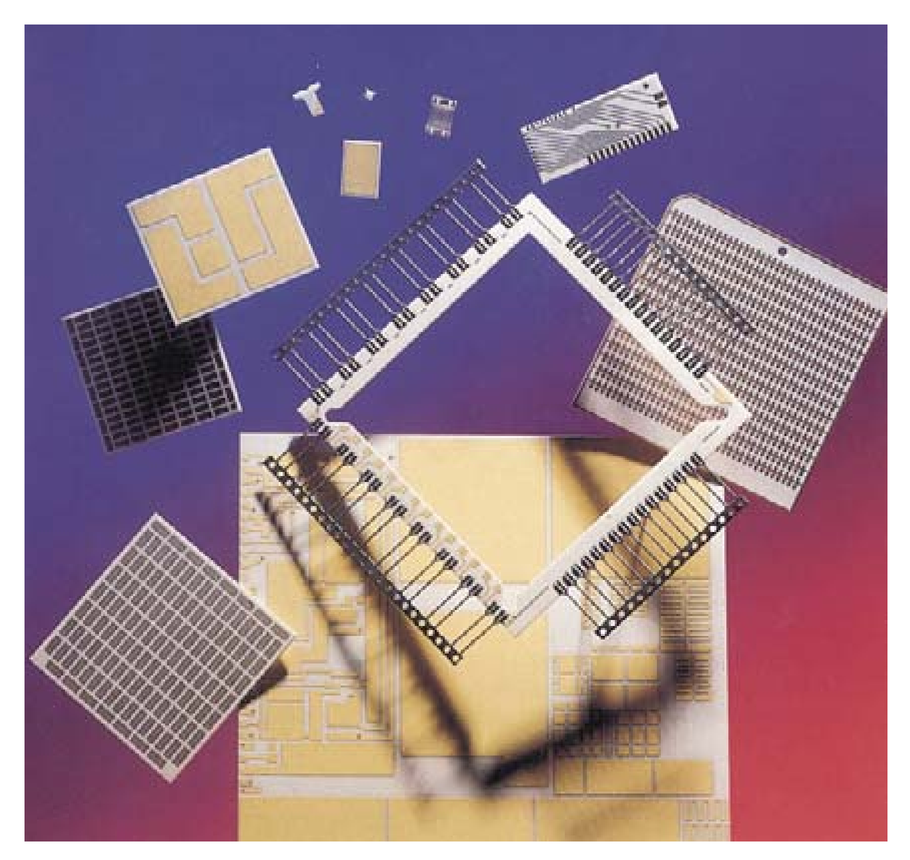
No hubiera sido factible dicha aplicación sin el desarrollo de distintos tipos de substratos con alta disipación térmica y óptimas características eléctricas, mecánicas y químicas. La fabricación de circuitos de potencia en técnica híbrida de capa gruesa aporta numerosas ventajas; por citar algunas, reducción de peso y tamaño, notable disipación térmica, alto rendimiento y fiabilidad. Entre los inconvenientes no podemos olvidar el tiempo de desarrollo medio-alto y su carestía.

Para poder manejar esta potencia los circuitos en THCG utilizan substratos disipativos en grado sumo, que se resumen en dos tipos fundamentales, los cerámicos y los metálicos con dieléctrico.

Vayamos con los primeros. La alúmina ha sido el substrato cerámico tradicional en THCG, pero sus pobres características de disipación térmica la han relegado a aplicaciones de baja potencia. Para disponer de mayor potencia se han ido desarrollando nuevos materiales, que, manteniendo unas buenas características eléctricas, gozan de propiedades térmicas valiosas. Ejemplos de éstos son el nitruro de aluminio, el óxido de berilio y el acero esmaltado.

La conductividad térmica del óxido de berilio, cifrada en 250 watt por metro y kelvin, decuplica la de la alúmina. Se entiende, pues, que se le considere el mejor material para aplicaciones de potencia. Tiene el talón de Aquiles en su alta toxicidad. Otros inconvenientes son su elevado coeficiente de expansión térmica, su fragilidad mecánica y su coste.

El nitruro de aluminio posee una conductividad térmica 7 veces mayor que la alúmina, es decir, unos 180 watt por metro y kelvin. Menos elevada que la del óxido de berilio, tiene en su haber que no es tóxico. Además, su coeficiente de expansión térmica es muy similar al del silicio, factor fundamental para evitar problemas de ruptura al emplear circuitos integrados sin encapsular. Posee unas excelentes características mecánicas y eléctricas. En su contra está el precio y una oxidación superficial, a temperaturas próximas a los 800 ºC, que



2. Diversas muestras de sustratos metalizados, sobre alúmina (Rubalit®) y nitruro de aluminio (Alunit®), de CeramTec

representa un problema de adherencia para las pastas empleadas en capa gruesa.

¿Qué decir de los sustratos metalizados? La estructura física de los conductores en capa gruesa presenta una seria limitación para manejar intensidades de corrientes elevadas. Las pequeñas secciones que se utilizan y la notable resistividad de las tintas conductoras provocan caídas de tensión considerables y pérdidas de potencia. Para aumentar la intensidad, se emplean bases metálicas sobre el sustrato cerámico (Al_2O_3, BeO o AlN), bases que pueden ser cobre, molibdeno, kovar (y materiales compuestos de alta conductividad eléctrica). Las bases metálicas se recubren de níquel y un pan de oro para prevenir corrosiones y aumentar la soldabilidad. El proceso se realiza por metalización por capa gruesa, metalización refractaria, metalización por capa directa de cobre y revestimiento térmico.

Por último, los sustratos metálicos. Cuando los circuitos electrónicos deben soportar altas temperaturas o se producen grandes esfuerzos mecánicos conviene trabajar con sustratos metálicos aislados, esmaltados con porcelana, de donde su acrónimo PEMS ("Porcelain Enamelled Metal Substrates"). El material base es el acero inoxidable con un bajo contenido de carbono; en su defecto, se recurre al cobre, cobre con molibdeno o cobre con INVAR.

El procesado del sustrato comienza con las operaciones de mecanizado necesarias para adaptarlo al entorno de trabajo. Se deposita luego el aislante por serigrafía y posterior sintetizado, o mediante electroforesis, que permite fijar con precisión el espesor de la capa. Por último se realiza el circuito exactamente igual que cuando se emplean sustratos cerámicos. Las ventajas son muchas: alta conductividad térmica (hasta 55 watt por metro y kelvin), buena respuesta al choque térmico, resistencia a fuertes aceleraciones, choques, vibraciones y posibilidad de generar planos de masa con el propio sustrato metálico.

EDUARDO GARCÍA BREIJO
y JAVIER IBÁÑEZ CIVERA
Laboratorio de Microelectrónica Híbrida
Universidad Politécnica
de Valencia

Ecosistemas litorales

Ciclo del fósforo

Una de las cuestiones que tiene planteada la oceanografía actual es la referente a los factores que controlan el crecimiento algal en los océanos. ¿Por qué reviste tanto interés el asunto?

Las algas marinas, o fitoplancton, absorben una buena parte del gas atmosférico que genera el efecto invernadero, el dióxido de carbono (CO_2). El fitoplancton consume CO_2 durante la fotosíntesis y, mientras crece, lo transforma en biomasa algal. Estos organismos, que se sitúan en la base de las cadenas tróficas marinas, representan el sustento básico para el zooplancton y otras especies. Cuando se alimenta y excreta, el zooplancton produce partículas de proporciones suficientes para precipitar allende la zona fótica, entre los 30 y 150 m de profundidad. Mediante este proceso, el CO_2 se convierte en materia orgánica y queda fuera del intercambio con la atmósfera durante miles de años. A medida que las concentraciones de CO_2 vayan incrementándose con los aportes antropogénicos, la capacidad de los océanos de incorporar CO_2 aumentará en importancia.

Entre los factores que gobiernan el crecimiento y la distribución del fitoplancton destaca la disponibilidad de nutrientes. La dinámica de las redes tróficas es compleja y resulta difícil discernir qué nutriente importa más en cada momento o lugar. No basta la simple medición de la concentración de un nutriente para responder a esta inquietud. Se impone determinar la tasa de reciclado del nutriente y el compuesto que forma. Por ejemplo, el fósforo inorgánico (HPO_4^{2-}) se utiliza preferentemente al ácido fosfoglicérico ($C_3H_7O_7P$). El fósforo (P) es un nutriente esencial requerido por los organismos para todo tipo de procesos, desde la transferencia de energía hasta la formación de estructuras celulares. El fósforo penetra en el mar a través de los aportes continentales, predominantemente. En las capas superficiales, el fósforo inorgánico disuelto se consume durante el crecimiento del fitoplancton y se regenera en el proceso de remineralización, que consiste en transformar en compuestos inorgánicos simples la materia orgánica disuelta.

De acuerdo con observaciones recientes, las bacterias pueden desempeñar una función importante en

este proceso de remineralización. Pero no acaba de determinarse qué compuestos de la materia orgánica disuelta se hallan a disposición de las bacterias remineralizadoras. En ensayos de laboratorio las bacterias consumen ésteres y nucleótidos monofosfatados, compuestos específicos de fósforo orgánico disuelto (POD). Se desconoce con qué intensidad y en qué condiciones intervienen las bacterias en la remineralización.

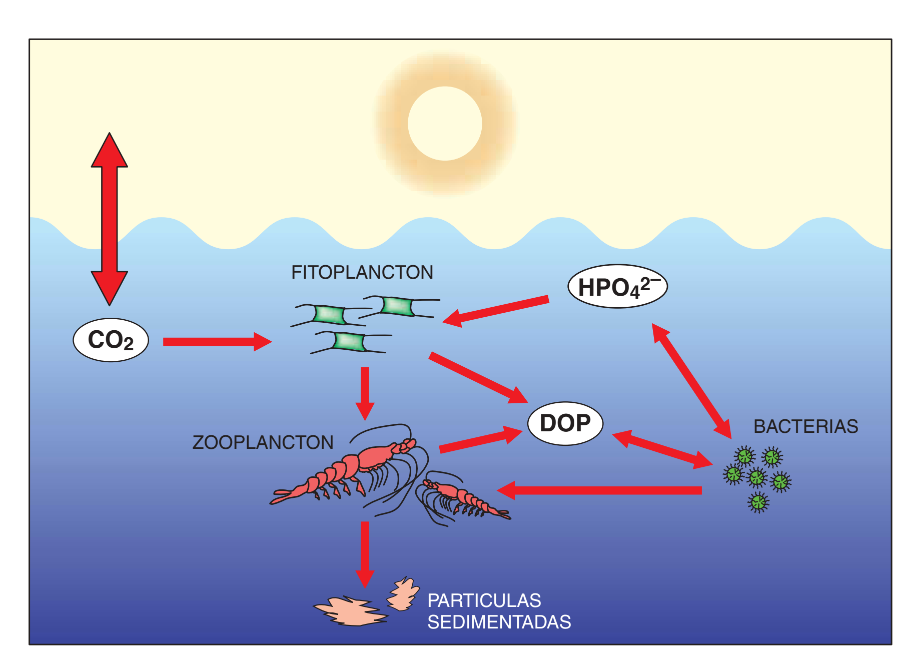
Para investigar el reciclado del fósforo en las capas superficiales de los océanos se recurre a los radioisótopos ^{32}P y ^{33}P. Los radioisótopos son elementos que se degradan a lo largo de períodos de tiempo conocidos. Constituyen, pues, una especie de reloj que nos permite acotar la edad media del fósforo en un reservorio, sin perturbar el sistema ni trastocar su dinámica interna.

Además, los factores que afectan al fósforo quedan registrados en la distribución del ^{32}P y el ^{33}P; en consecuencia, podemos trazar el ciclo del fósforo a lo largo del tiempo y determinar los procesos que lo controlan. Mientras no se dispuso de esa técnica, la ciencia sólo podía vislumbrar instantáneas del ciclo marino del fósforo mediante interpretaciones extrapoladas de los procesos observados en distintas estaciones de muestreo.

Los radioisótopos ^{32}P y ^{33}P se han aplicado al estudio del ciclo del fósforo en los ecosistemas litorales. La autora y K. O. Buesseler han hallado que, al margen de la concentración real de fósforo, la tasa de reciclado del fósforo inorgánico disuelto (PID) es siempre rápida. La observación induce a pensar que con bajas concentraciones de PID se obtienen valores más altos de producción biológica que los que se suponía. Hemos descubierto también que el tiempo de reciclado de fósforo orgánico disuelto (POD) es más largo, prueba de que los organismos no pueden contar con la mayor parte de esa fuente nutritiva. Había, sin embargo, una proporción muy pequeña del POD aprovechada por las bacterias en el verano.

De ello se infiere que el POD abarca un grupo muy diverso de compuestos químicos que se reciclan a distintas escalas de tiempo. La pequeña concentración de POD disponible para las bacterias es más joven (a escala de cientos de años) que el reservorio de PID. Esa fracción joven de compuestos de fósforo —ésteres monofosfatados y nucleótidos— constituye, probablemente, una parte que se ha reciclado muy deprisa en las comunidades de plancton marino.

Nos encontramos, en resumen, ante una mezcla de procesos complejos, que varían a lo largo del año y controlan el ciclo biogeoquímico del fósforo en sistemas litorales. El uso de este nuevo concepto para comparar el efecto de la liberación del CO_2 atmosférico implica utilizar modelos ecológicos predictivos. Estos modelos imitan la dinámica de las cadenas tróficas en las capas superficiales oceánicas para determinar la cantidad de CO_2 incorporado por los océanos. Nuestros avances recientes en el conocimiento del ciclo del fósforo han demostrado que cualquier modelo predictivo deberá incorporar las bacterias en presencia de POD como fuente adicional de fósforo.



Esquema simplificado del ciclo del fósforo en las capas superficiales del océano

CLAUDIA BENÍTEZ NELSON
Escuela de Ciencia y Tecnología del Océano y de la Tierra,
Universidad de Hawai

Gaia

Mar, azufre y clima

La amenaza del calentamiento global nos ha hecho tomar conciencia del poder que tiene la especie humana para alterar la estabilidad del planeta. Menos conocido es que el conjunto de los seres vivos, en especial los microorganismos, provocaron en el pasado cambios globales; ellos fueron también los que, durante la mayoría de los miles de millones de años de vida en la Tierra, han mantenido las condiciones ambientales dentro de unos márgenes de variabilidad razonablemente estrechos.

A mediados de los años setenta nació la teoría “Gaia”, que presenta al planeta, gracias a la presencia de la vida, como un macrosistema que regula su composición y temperatura por medio de mecanismos de retroalimentación.

En 1999, el autor y Carles Pedrós-Alió, del Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona, describimos el eslabón que faltaba para cerrar un mecanismo de retroalimentación entre vida marina y clima a través de la producción de azufre atmosférico. Los datos de los que partimos los obtuvimos en 1998 en el Atlántico norte, a 400 km al sur de Islandia.

La atmósfera terrestre tiene una composición en desequilibrio químico. Si mantiene una mezcla de especies químicas reducidas y oxidadas es gracias al intercambio constante de gases con la biosfera. No sólo muchos organismos viven gracias a su capacidad de obtener de la atmósfera sustancias esenciales para las funciones de supervivencia y desarrollo; ocurre también que la vida determina la composición química de la atmósfera y los fenómenos que derivan de ésta.

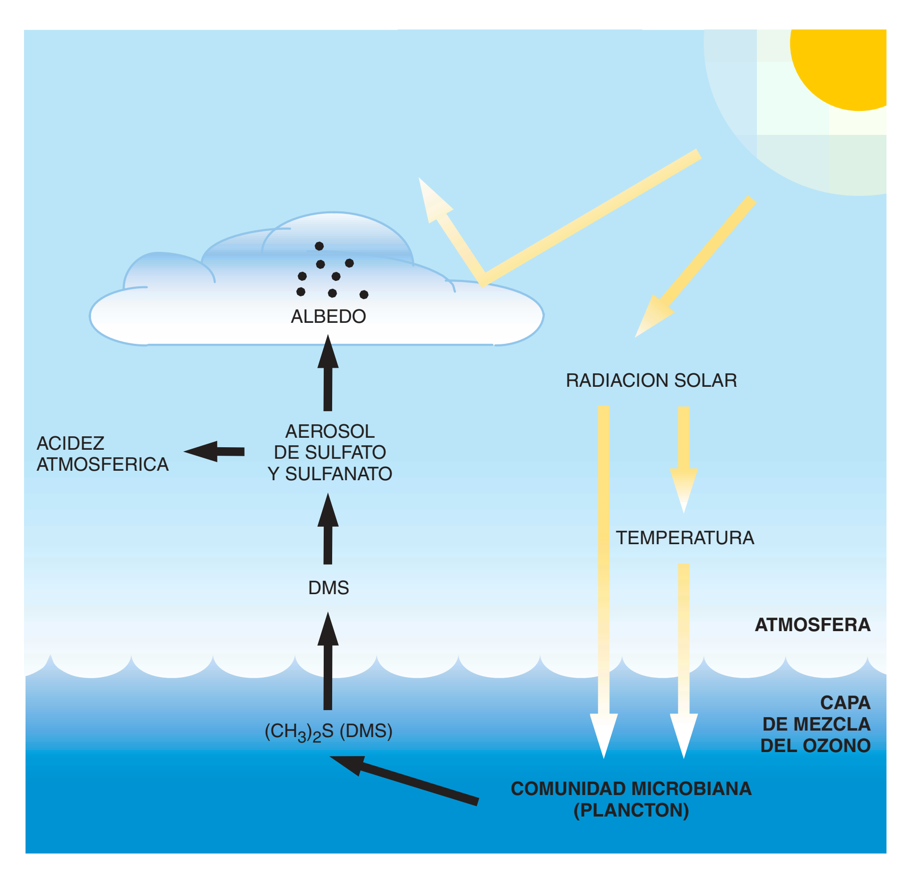
La composición de la atmósfera tiene una influencia fundamental sobre la cantidad y calidad de la radiación (ultravioleta, onda larga) que llega a la superficie terrestre o escapa de ella. Influye, asimismo, sobre el clima (régimen hidrológico, de temperatura, de movimientos de masas de aire). La actual transformación antropogénica, rápida e intensa, de la composición atmosférica está causando efectos todavía poco conocidos de calentamiento global (aumento del efecto invernadero) y de aumento de la radiación ultravioleta (debilitamiento de la capa de ozono).

La actividad humana aparece como un factor de cambio ambiental que se superpone a la evolución de los intercambios entre biosfera y atmósfera. Para determinar el alcance de dicho cambio añadido es preciso desentrañar los mecanismos que rigen el control climático de la Tierra y, a partir de ahí, predecir la respuesta de los mismos ante las variaciones rápidas e intensas de hoy.

Entre tales mecanismos destaca el que vincula el plancton oceánico, el azufre atmosférico y el clima. Parte fundamental del ciclo global del azufre es la emisión, de los océanos a la atmósfera, de azufre reducido de origen biológico. Se produce principalmente en la forma del compuesto volátil sulfuro de dimetilo (DMS).

En la atmósfera, la oxidación rápida del DMS da lugar a partículas acídicas que dispersan radiación y actúan como núcleos de condensación en la troposfera oceánica. El tamaño y la abundancia de los núcleos de condensación determinan la densidad óptica de las nubes y, por consiguiente, la cantidad de radiación solar que éstas reflejan hacia el espacio exterior (albedo).

En 1987, R. Charlson, J. Lovelock, M. Andreae y S. Warren sugirieron que el efecto del azufre biogénico marino sobre el albedo podía constituir la base de un mecanismo retroalimentado entre vida marina y clima: un incremento de la producción de DMS por el plancton provocaría un incremento del albedo sobre los océanos, con la consiguiente disminución de la radiación incidente y la temperatura. Esa caída determinaría, a su vez, una menor actividad fotosintética de las algas. Si dicha disminución de la actividad algal ocasionara un freno a la producción de DMS, el ciclo se cerraría, a la manera de



1. Ciclo de interacción entre el plancton oceánico, el azufre atmosférico y el clima. El calentamiento del agua superficial del océano fomenta una mayor producción planctónica de sulfuro de dimetilo (DMS) y, en última instancia, un mayor efecto filtrante de la radiación solar en la atmósfera sobre el océano. La consiguiente disminución de la radiación incidente conlleva el efecto opuesto en el agua superficial, lo que cierra un mecanismo de retroalimentación negativa entre plancton y radiación solar

un mecanismo de retroalimentación negativa o de autorregulación.

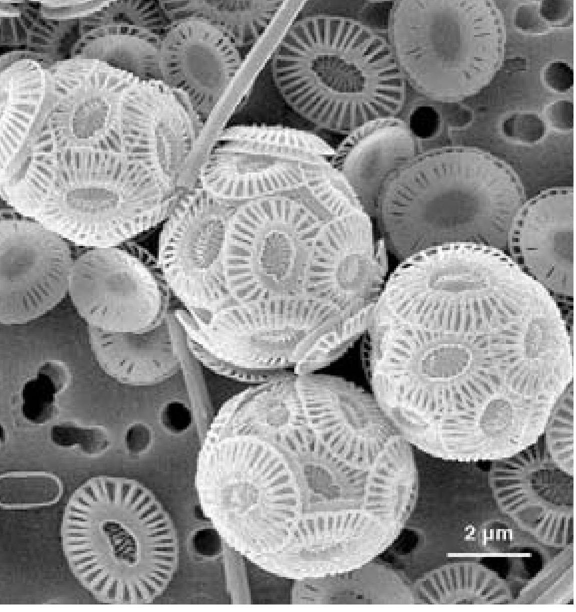
Dicho mecanismo hipotético adquiría significación en el marco de la teoría "Gaia". La teoría de Lovelock establece que la vida y la carcasa geoquímica del planeta (incluida la atmósfera) evolucionan conjuntamente, son interdependientes y traban relaciones que conducen a cierta homeostasis (autorregulación climática) de la Tierra.

La hipótesis de la vinculación del plancton, el azufre atmosférico y el clima despertó interés, y controversia, en la comunidad científica. En diversos países se promovió el estudio de la distribución del DMS en los océanos, la identificación de sus procesos de producción y la estima de sus flujos de emisión a la atmósfera. Fruto de aquel impulso investigador son los más de 700 trabajos aparecidos en el último decenio.

Se ha detectado DMS en aguas superficiales de todos los océanos y en la atmósfera marina. Recientemente se ha demostrado que existe una buena correlación en el espacio y en el tiempo —y también una relación causa-efecto— entre el DMS liberado a la atmósfera y la concentración de núcleos de condensación en la troposfera oceánica remota.

Se ha descubierto que el precursor bioquímico del DMS es el propionato de dimetilsulfonio (DMSP), la forma más abundante de azufre reducido orgánico en muchas especies de algas unicelulares, en las que desempeña funciones fisiológicas esenciales: soluto compatible para la osmorregulación y la crioprotección, principal transportador de azufre a lo largo de las cadenas tróficas, dador de grupos metilo en reacciones metabólicas y precursor de señales químicas para la atracción o repulsión entre depredador y presa.

El DMSP algal se transmite y transforma mediante procesos de degradación a través de la red trófica, con intervención de los herbívoros planctónicos y las bacterias. El DMS es



2. *Imagen de microscopía electrónica de barrido de varios individuos de la especie* Emiliania huxleyi*, alga unicelular recubierta de pequeñas placas calcáreas ornamentadas. Este microorganismo forma, a principios de verano, extensas proliferaciones en diversas regiones oceánicas, entre ellas el Atlántico norte.* E. huxleyi *es una de las muchas especies de fitoplancton que contienen elevadas concentraciones de propionato de dimetilsulfonio (DMSP), por lo que su presencia asegura la emisión de azufre volátil a la atmósfera, con el consiguiente impacto sobre la química atmosférica y el clima.* (Micrografía de L. Cros y J. M. Fortuño, del ICM-CSIC.)

uno de los productos de degradación del DMSP, pero hay otros.

Hasta ahora, las investigaciones habían confirmado el potencial del DMS oceánico, de origen biológico, para el control del albedo y del balance de radiación de extensas regiones del planeta. Menos seguro era que nos halláramos ante un mecanismo de retroalimentación. No se sabía si los incrementos de radiación conllevaban un aumento de la producción y emisión de DMS en el océano, y viceversa.

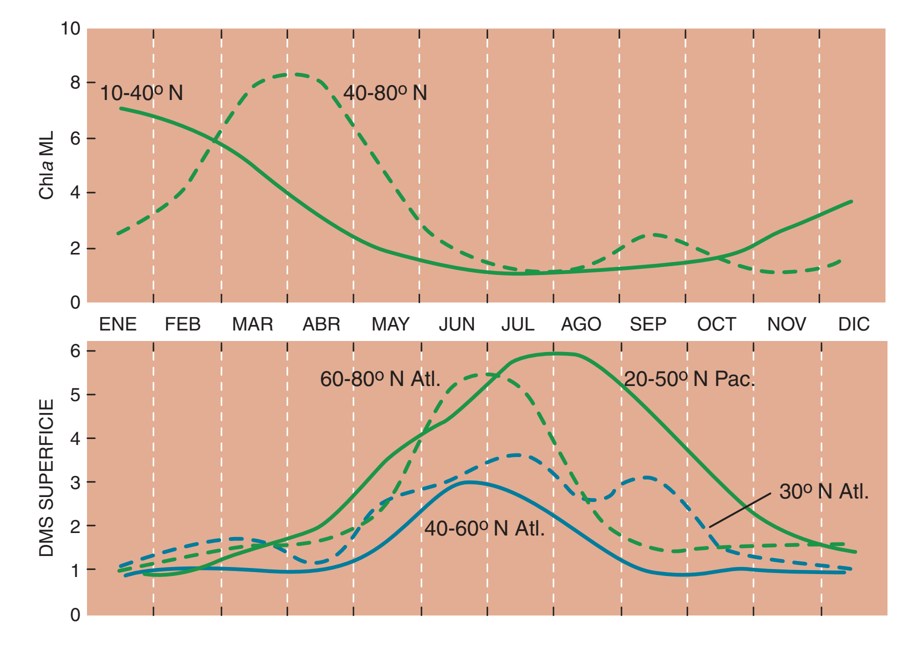
Los estudios encaminados a resolver la cuestión partían, unos, de un enfoque fisiológico. Se buscaba determinar el efecto ejercido por la intensidad y duración de la luz, así como por las variaciones de temperatura, en la biosíntesis de DMSP en cultivos *in vitro* de algas. Otros trabajos insistían en descubrir una relación directa entre abundancia algal o actividad fotosintética y la emisión de DMS.

En ningún caso, sin embargo se arribaba a una conclusión convincente. La producción de DMS es el resultado de un entramado de procesos de interacción en la red trófica, algo muy difícil, si no imposible, de reproducir en el laboratorio o de entender tomando en cuenta solamente un factor. Quedaba cada vez más claro que había que recurrir a planteamientos ecológicos, considerar *in situ* el ecosistema y abordar el problema a la escala adecuada.

Es lo que hicimos Simó y Pedrós-Alió conjuntamente con un grupo británico, a bordo del buque oceanográfico *Discovery*. Gracias a una nueva técnica de muestreo lagrangiano se estudió la variabilidad temporal a corto plazo de los procesos de producción y emisión de DMS en el océano abierto. Observamos que las tasas de degradación del DMSP y de producción del DMS variaban con la misma rapidez que la radiación solar y el régimen de viento, parámetros meteorológicos. Los resultados abrían una puerta a la posibilidad de encontrar relaciones directas entre parámetros derivados del clima y producción de DMS en el ecosistema oceánico.

Los datos recabados en el Atlántico norte, con las nuevas perspectivas que descubrían, nos impulsaron a analizar las distribuciones de DMS registradas en la bibliografía pertinente. Dicho análisis ha permitido elaborar una nueva hipótesis que refrenda la de 1987: la producción de DMS por el plancton marino está controlada por la mezcla vertical del agua, más concretamente, por el grosor de la capa superficial del océano (capa de mezcla). Las capas de mezcla poco profundas (causadas por un calentamiento diurno de la superficie del océano durante situaciones de elevada radiación) favorecen la producción de DMS.

La explicación cabe buscarla en que el grosor de la capa de mezcla determina el grado de exposición de los microorganismos marinos a la radiación ultravioleta. Si bien el DMS es un producto de degradación enzimática del DMSP, no constituye el único. La cantidad de azufre que, originándose en el DMSP algal, termina en la atmósfera y participa de la regulación del clima, depende del rendimiento de la transformación del DMSP en DMS. Dicho rendimiento viene mediado por enzimas de algas y bacterias, que se ven afectadas directa o indirectamente por la radiación ultravioleta.



3. *La "paradoja estival del DMS": las concentraciones máximas de DMS se observan en los meses de verano, cuando la cantidad de plancton en la superficie del océano está en su mínimo anual. Arriba se ofrece la variación anual de la concentración de clorofila* ***a*** *(Chla, indicativa de la biomasa de fitoplancton) en la capa de mezcla (ML), en los rangos de latitud indicados. Abajo, variación anual de la concentración de DMS en el agua superficial en los rangos de latitud indicados. En ambos casos, las concentraciones están normalizadas respecto al mínimo anual*

La observación de rendimientos mayores en aguas estratificadas, que además son más favorables al desarrollo de las especies de fitoplancton más productoras de DMSP, nos ha permitido explicar la “paradoja estival del DMS”: en vastas regiones del océano se produce y acumula más DMS en verano (o en la estación caliente), a pesar de que las condiciones no son las idóneas para el crecimiento del plancton y la biomasa del fitoplancton está en su mínimo anual.

Cuanto más intensa es la radiación incidente y más se calienta el agua superficial, mejores son las condiciones para la producción de DMS. Se trata de la primera prueba de una relación directa entre parámetros climáticos y producción de azufre volátil en el mar. Prueba que respalda la hipótesis de 1987 de retroalimentación negativa entre plancton y clima por medio del azufre.

Además, nuestros resultados insinúan otra hipótesis interesante. Dado que los modelos de cambio climático global prevén una intensificación, expansión y prolongación de la estratificación superficial de los océanos, el progresivo aumento del efecto invernadero podría coincidir con un aumento de la emisión de DMS, que conlleva un efecto climático inverso. Se trata tan sólo de una hipótesis de trabajo; la cuantificación de estos efectos acoplados y de signo opuesto constituye un reto formidable. De momento se ha dado un paso firme en la comprensión de una de las relaciones bidireccionales más emblemáticas y fascinantes entre la biosfera y el clima.

RAFEL SIMÓ,
Instituto de Ciencias del Mar
(CSIC), Barcelona

Negocio espacial

Nuevos modelos, nuevas compañías

Nada altera tanto la serenidad de la pluviselva tropical como el lanzamiento de un cohete. En la Guayana francesa, los pescadores locales, que siguen faenando con sus canoas en las riberas costera de Kourou, se desvelan cada tres semanas con la técnica más avanzada. Un cohete Ariane 4 retumba el cielo para transportar un satélite hasta su órbita prevista.

Kourou se ha convertido en centro de lanzamiento de satélites geosíncronos. “Por el momento, tenemos más del 55 por ciento del mercado mundial”, dice Jean-Yves Trebaol, director de operaciones de Ariane. “Nos proponemos mantener este porcentaje y alcanzar el 30 por ciento del mercado de constelaciones [satélites asíncronos]”. Pero la consecución de ese objetivo dependerá de la fiabilidad de último cohete. La competencia se endurece a medida que otras firmas quieren su parte en el negocio de lanzamientos.

La primera empresa comercial de transporte espacial, Arianespace, aprovechó el vacío que se abrió en el campo de los misiles cuando la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) abandonó los vehículos de un solo lanzamiento, para así amortizar su ambicioso programa de lanzaderas espaciales. Estas serían el principal vehículo de carga, oficial o comercial. Pero semejante política se fundió con el *Challenger* en 1986. En 1990, la NASA anunció que dejaba de aceptar cargas comerciales a menos que “requirieran las capacidades únicas” que ofrecían las tripulaciones de las lanzaderas.

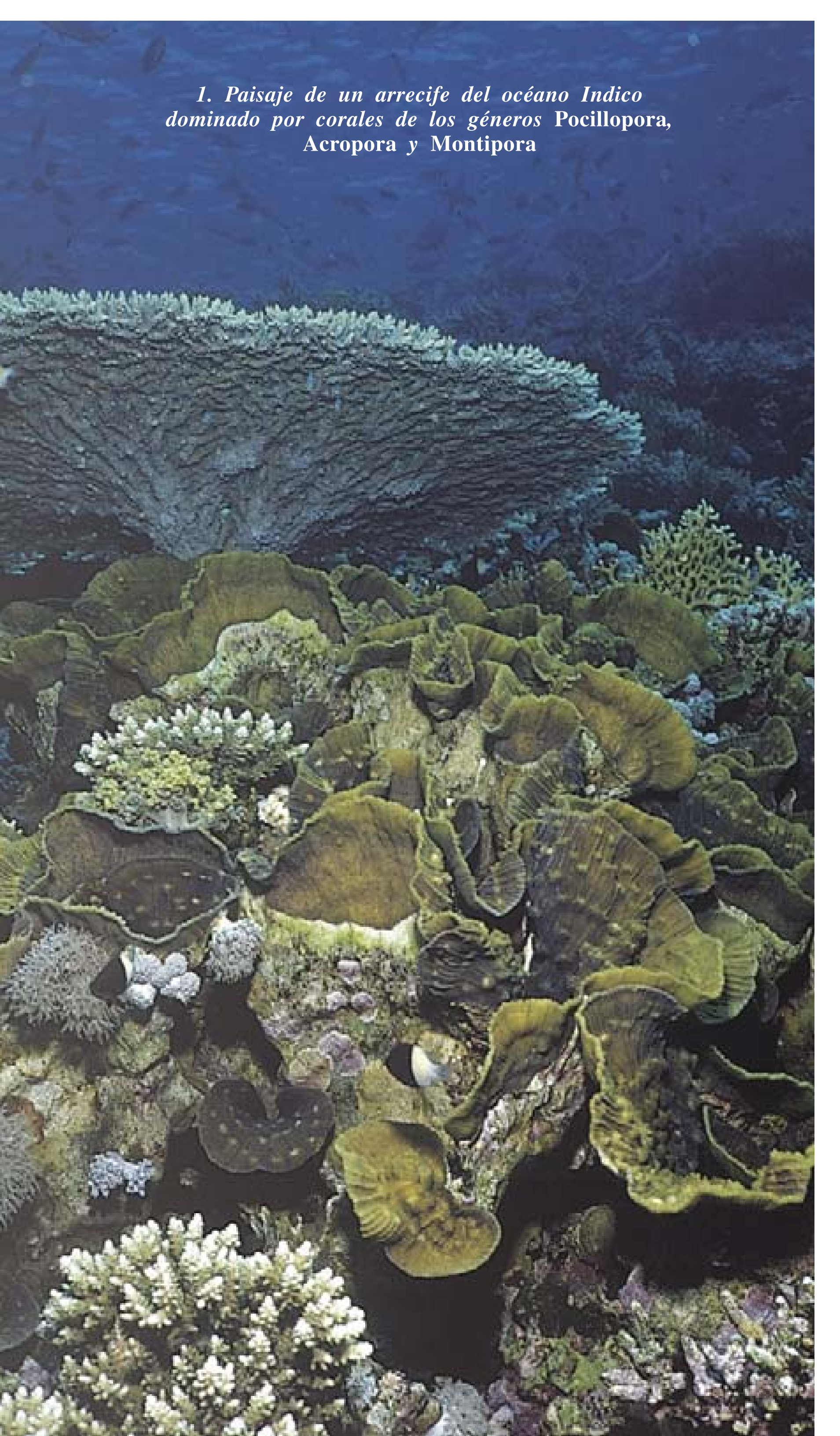
En cualquier caso, a los clientes les salía más barato lanzar cargas desde Kourou que desde Cabo Cañaveral, gracias al impulso adicional proporcionado por la rotación terrestre.

La competencia no duerme. Junto con el impulsor de alta carga Atlas, de Lockheed-Martin y el Delta de Boeing (los cuales han sufrido ambos espectaculares fracasos recientemente), el Proton ruso y el Larga Marcha chino se hallan listos para lanzamientos comerciales. El más joven de los concursantes: Sea Launch, consorcio que incluye Boeing, RSC-Energia de Rusia y KB Yuzhnoye/PO Yuzhmash, de Ucrania, que construyen el cohete Zenit. Como su nombre implica, el impulsor del Sea Launch inicia su viaje desde el océano Pacífico, partiendo de una plataforma de perforación petrolífera situada en el ecuador y reconvertida. La seguridad del alcance no es un problema allí y los satélites pueden alcanzar una órbita geosincrónica más rápida y económicamente que desde Kourou o el Cabo. Un buque de aprovisionamiento, el *Commander*, puede transportar tres Zenits por mar; los cohetes se izan después hasta la plataforma por medio de una grúa.

DE CERCA

Texto y fotos: Josep-Maria Gili y Sergio Rossi

El sotobosque marino



1. Paisaje de un arrecife del océano Indico dominado por corales de los géneros Pocillopora, Acropora *y* Montipora

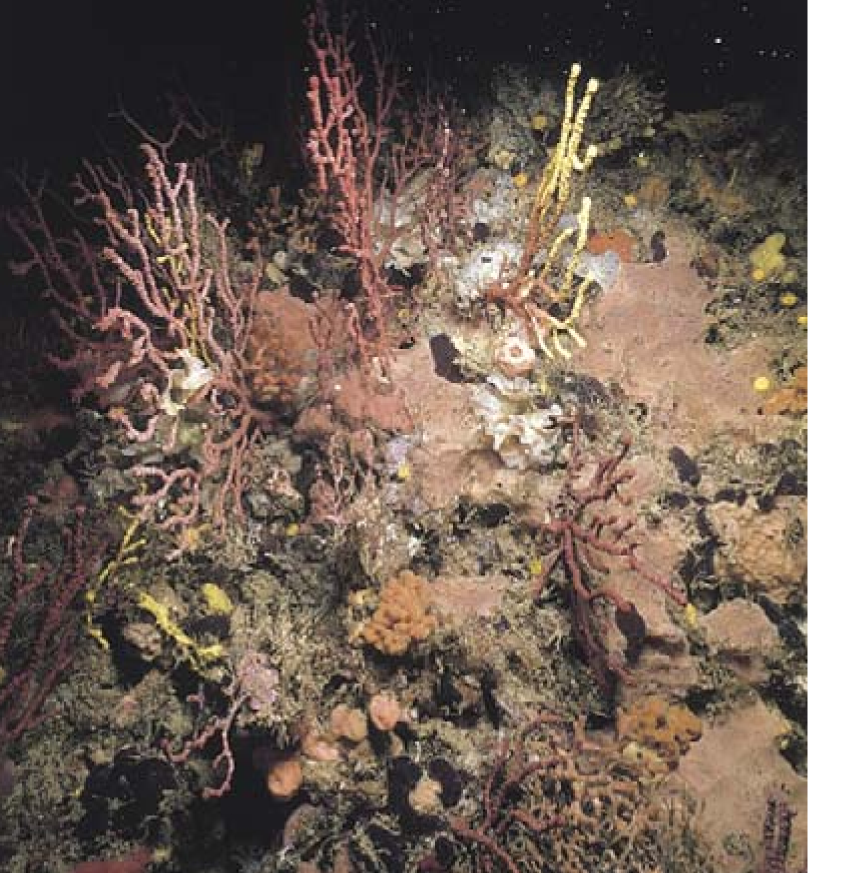
Bajo las aguas litorales del Mediterráneo y los trópicos crecen bosques de gorgonias y corales. Forman comunidades estratificadas. Y como no hay bosque sin sotobosque, también lo encontraremos en esos parajes sumergidos.

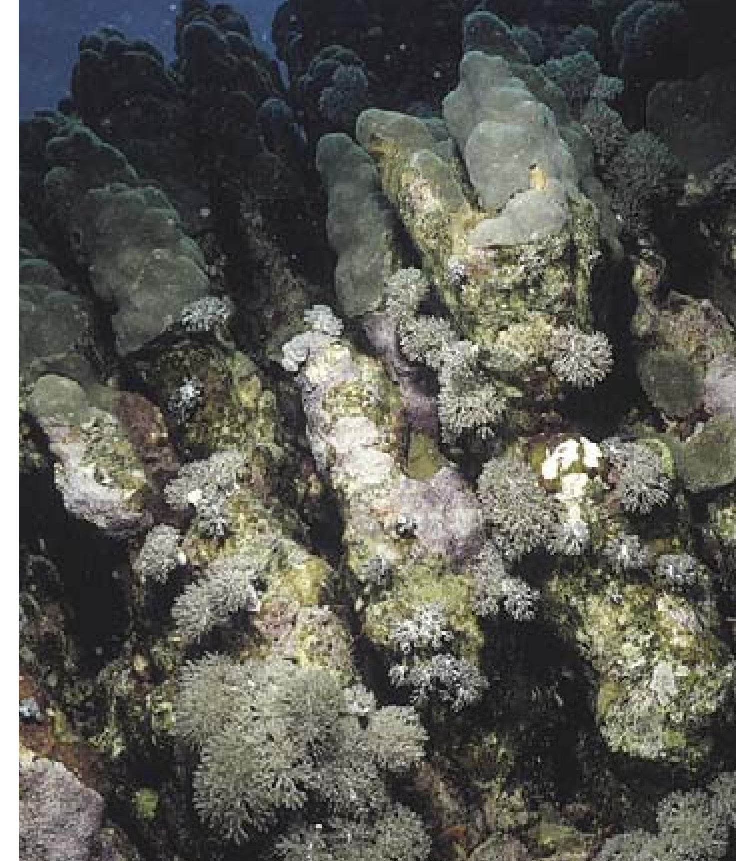
Protegidos por los árboles medran organismos móviles y sésiles en el bosque mediterráneo, en sus encinares característicos. En los bosques de cnidarios son muchos también los que se aprovechan de la estructura y resguardo que les prestan gorgonias y corales. Bajo los árboles crecen matas y arbustos; en el bosque marino, el equivalente de esa vegetación tridimensional corresponde a briozoos, poliquetos, ascidias, algunas esponjas y cnidarios más pequeños (como hidrozoos o alcionarios), sin olvidarnos de las algas carnosas.

La vegetación rastrera, pegada al sustrato rocoso, son aquí organismos bidimensionales, amén de esponjas, briozoos, tunicados, cnidarios y algas incrustantes. Debido a la enorme heterogeneidad de estructuras externas, se forman huecos y recovecos que aprovechan infinidad de animales para refugiarse y buscar alimento.

Aunque la obtención de alimento pudiera parecer más difícil para los moradores del sotobosque y para las estructuras bidimensionales, la verdad es que tales organismos se hallan menos expuestos a la agresividad de temporales o corrientes marinas que las gorgonias y corales.

En el primer estrato (la "bóveda arbórea") algas y animales viven aferrados de formas muy diversas. Para aprovechar las corrientes pueden, por ejemplo, aumentar la superficie expuesta. Al seguir esta estrategia pueden sobrecargar a las gorgonias "árboles" fascinantes y creadores de diversidad biológica. Por último merecen capítulo aparte moluscos bivalvos o poliquetos excavadores, capaces de perforar el substrato rocoso para refugiarse.





2. Comunidad del coralígeno mediterráneo dominada por gorgonias del género Paramuricea (arriba, izquierda). *Visión lateral del esqueleto de una comunidad coralina. Podemos apreciar las grietas y cavidades del arrecife completamente colonizadas por esponjas, alcionarios y muchas especies más* (arriba, derecha)



3. Cavidad de un arrecife generada por el crecimieto de un coral laminar sobre el esqueleto de otro coral masivo. La cavidad sirve de refugio y habitáculo de numerosos organismos





4. Dos imágenes de la comunidad situada justo en la base de las gorgonias del coralígeno mediterráneo. La complejidad del conjunto se evidencia con mayor nitidez sobre el sustrato. Madreporarios, tubos de poliquetos, ascidias, briozoos y otros muchos conforman un sustrato que, gracias a sus esqueletos calcáreos, creará una estructura similar a la de un arrecife coralino

¿Para qué ir a Marte?

En este primero de una serie de artículos sobre las misiones tripuladas a Marte, se aborda el objetivo principal de la empresa: la búsqueda de vida

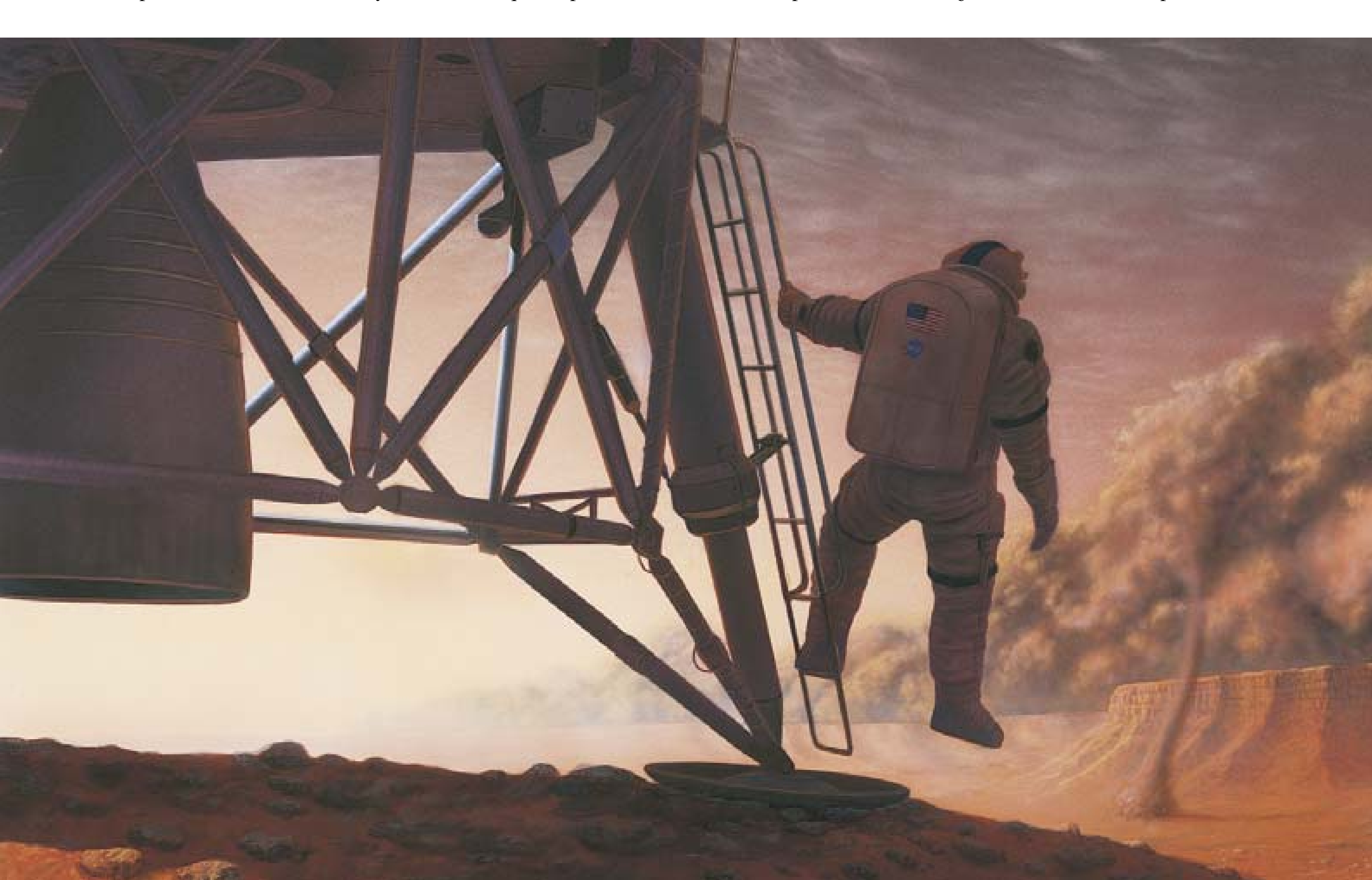
Glenn Zorpette

Durante siglos, los exploradores han arriesgado la vida aventurándose en terreno desconocido por razones que van de lo económico a lo patriótico. Cristóbal Colón puso rumbo al oeste para encontrar mejores rutas comerciales hacia Oriente y a mayor gloria de España. Lewis y Clark se adentraron en el occidente ignoto del Mississippi para averiguar qué había adquirido EE.UU. al comprar Luisiana a los franceses. Y los astronautas del *Apolo* fueron lanzados a la Luna en una espectacular exhibición de poder técnico durante la guerra fría.

En las exploraciones del pasado se mezclaban los imperativos comerciales y los político-militares, pero los descubridores que las llevaron a cabo consiguieron que la ciencia progresase por el simple hecho de haber viajado a rincones no hollados. Lewis y Clark se trajeron muestras, descripciones y dibujos de la flora y fauna del oeste americano, en su mayor parte desconocidas para los colonizadores y la cultura que representaban. También el programa *Apolo* acabaría por aportar buenos datos. Según Paul D. Spudis, del Instituto Planetario y Lunar de Houston, “lo que sabemos de la historia geológica global de la Luna se lo debemos, en gran medida, a las tres últimas misiones *Apolo*”.

Hoy es Marte la próxima *terra incognita* de la humanidad. Con una perspectiva incierta en cuanto a los beneficios económicos a corto plazo, diluido el recuerdo de la guerra fría y creciente la tendencia a la cooperación internacional en las grandes iniciativas espaciales, está claro que deberán ser otros motivos, distintos del beneficio económico o el patriotismo, los que impulsen a poner el pie en su superficie. ¿Acaso la ciencia, cuyo papel en las exploraciones ha sido tanto tiempo secundario, se halla destinada por fin a desempeñar el papel protagonista?

Esta pregunta suscita de forma natural otras dos: ¿Hay experimentos que en Marte sólo podrían ser hechos por el hombre? ¿Nos darían esos experimentos



conocimientos tan profundos como para justificar el gasto de una misión humana interplanetaria?

En cuanto a Marte se refiere, nunca ha habido científicamente tanto en juego. La cuestión de si hubo vida allí, y si aún subsiste, es de rabiosa actualidad; cada vez son más numerosas las pruebas que apuntan a que el planeta rojo tuvo alguna vez agua estable líquida, y perdura la controversia sobre la presencia de bacterias fósiles en un meteorito de origen marciano caído en la Tierra. Una respuesta concluyente sobre si ha habido vida, pasada o presente, ofrecería datos valiosos sobre la gama de condiciones en las que un planeta puede generar los complejos procesos químicos que la acunan. Si se estableciera que la vida surgió de forma independiente en Marte y en la Tierra, sería la primera prueba fehaciente sobre uno de los mayores misterios de la ciencia: la incidencia del fenómeno de la vida en el universo mundo.

"Si se encuentra alguna forma de vida, se habrá probado que los procesos que conducen a su aparición son generales", afirmó Robert Zubrin en un congreso celebrado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1999. "Es una cuestión de gran importancia desde el punto de vista filosófico, y Marte es la Piedra de Rosetta, la clave que necesitamos para hallar una respuesta."

Sólida prueba del agua líquida

Una de las razones por las que el envío de una misión tripulada resulta una idea cautivadora estriba en su posibilidad real. Los EE.UU. tienen el dinero y la técnica básica para ello. Y lo que reviste mayor interés: los recientes hallazgos sobre las condiciones ambientales del planeta en el pasado remoto han proporcionado un incentivo científico claro y contundente que justifica dicha misión, a saber, la búsqueda de pruebas de la existencia de vida.

La teoría de que el agua en estado líquido fue estable en Marte en alguna época ha sido ratificada por la sonda *Mars Global Surveyor*, que en 1999 fotografió un canal que parecía haber sido esculpido profundamente por torrentes de agua que fluyeron durante cientos de años, por no decir miles. Los descubrimientos impresionantes del *Global Surveyor* tuvieron lugar tras la fecunda misión del *Mars Pathfinder*, que se posó en el planeta en julio de 1997, convirtiéndose en uno de los primeros frutos del principio rector que había adoptado la NASA para la exploración espacial con robots: "misiones más baratas, más rápidas y mejores".

El *Pathfinder* fue saludado como una justificación del principio rector, pero lo bueno no duró mucho. El doble fallo de las misiones siguientes, el *Mars Climate Orbiter*, que costó 125 millones de dólares, y el *Mars Polar Lander*, de 165 millones, recordó cuántas cosas pueden salir mal hasta en misiones con robots sin excesivas complicaciones.

Aunque la NASA no ha recibido ningún mandato oficial de que realice misiones tripuladas a Marte, algunas de las sondas robots proyectadas debían hacer experimentos encaminados a preparar el envío de seres humanos. Tras el éxito del *Pathfinder*, en la NASA se hablaba informalmente de una misión tripulada que partiría hacia el 2020, fecha que, considerados los fracasos recientes, parece optimista.

A la caza de fósiles en Marte

Los defensores de la exploración humana se valen de los controvertidos hallazgos en los meteoritos y de los impresionantes resultados del *Surveyor* para hablar de los posibles descubrimientos y avances que



1. EL PRIMER PASEO en Marte sería aún más impresionante si cerca se arremolinaran tormentas de polvo. El vehículo de ascensión, al fondo a la derecha, trasladaría a los astronautas hasta una nave orbital para el viaje de regreso a casa.

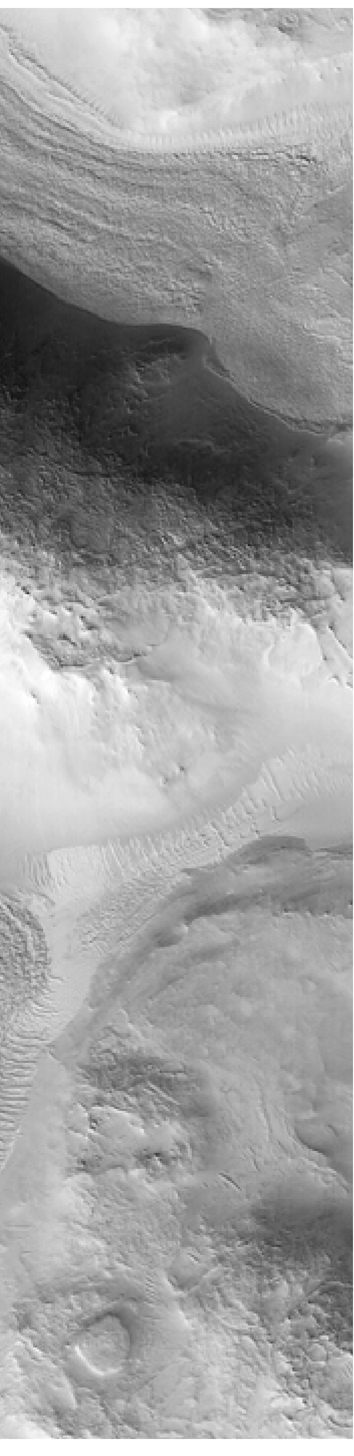
los expertos podrían hacer en Marte. Zubrin, por citar un ejemplo, sostiene que “si queremos abordar en serio la cuestión de la vida en Marte —su existencia y evolución—, resulta indispensable la misión tripulada”. Para reforzar su afirmación destaca que la búsqueda de pruebas fósiles de la existencia de vida del pasado implicaría “recorrer largas distancias por terrenos sin arreglar, cavar con piquetas, despedazar rocas, ir quitando con cuidado las capas de esquisto y cepillar con delicadeza el polvo. Estas tareas superan con creces la capacidad de un robot”.

Para muchos, la búsqueda exhaustiva de algún indicio de vida que, pese a la dureza de las condiciones, haya podido sobrevivir en Marte es también tarea de humanos. Esa vida estaría oculta y sería microscópica seguramente, dice Pascal Lee, del Centro de Investigación Ames de la NASA, y señala que “para descubrirla habría que examinar grandes extensiones de terreno”, lo que precisa “de un alto grado de movilidad y adaptabilidad”. Admite que, en un futuro lejano, los robots podrían llevar a cabo esa misión, pero, si quedase en sus manos, la búsqueda de vida en Marte llevaría muchísimo tiempo.

Para lograr los mismos objetivos científicos que una serie de misiones tripuladas se necesitarían muchas más misiones con robots, y por ende más lanzamientos. Un incremento en la cifra de lanzamientos se traduciría en un programa de exploración mucho más largo, por la propia limitación de las posibilidades de viajar de la Tierra a Marte. Sólo hay una cada 26 meses terrestres, cuando la posición de ambos planetas es tal, que el viaje interplanetario dura menos de un año. Existen dudas acerca de que un programa que se prolongue durante varios decenios sea capaz de mantener vivo el interés del público y de los políticos que eligen.

Otra razón por la que tendría que haber seres humanos *in situ* para que pudiese llevarse a cabo una búsqueda exhaustiva de vida es que, si existiera, lo más seguro es que se encontrase muy honda bajo la superficie. La atmósfera de Marte contiene trazas de un potente agente oxidante, peróxido de hidrógeno quizá. En consecuencia, las capas superiores del suelo no pueden contener materia orgánica. Por eso, para cazar microbios habría que perforar la superficie y llegar a las profundidades donde la vida o la materia orgánica estarían protegidas del agente oxidante y de los niveles destructivamente altos de luz ultravioleta.

Las sondas del futuro estarán provistas de un equipamiento robótico capaz de perforar la roca hasta varios centímetros de profundidad o de excavar unos metros bajo el suelo. Sin embargo, salvo que se produjera algún hallazgo a esos niveles tan superficiales, habrá que extraer muestras a una profundidad de cientos de metros, ahondar incluso uno o dos kilómetros, antes de que se pueda declarar a Marte vivo o muerto. Charles Elachi, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, sostiene que sólo el hombre podría extraer muestras a tales profundidades.



2. IMAGEN de alta resolución de Marte, tomada el 1 de enero de 2000, que muestra texturas insólitas en la superficie, formadas por procesos desconocidos que quizá sean exclusivos de allí. Este terreno del hemisferio norte pertenece a la región *Nilosyrtis Mensae*.

Son pocos los investigadores, si es que hay alguno, que no crean que una misión tripulada a Marte haría que la ciencia planetaria avanzase. El punto más conflictivo es el de la rentabilidad de las misiones tripuladas en comparación con los robots. El problema es que se sabe tan poco de varios factores clave, que cualquier análisis tiene que basarse en suposiciones en muy buena medida arbitrarias.

Pero, además, es difícil predecir qué capacidad tendrán los robots de aquí a cinco o diez años. El tipo de técnica robótica que puede hoy enviarse a otro planeta conforme al principio de la NASA de “más barato, más rápido y mejor” no vale ni para jugar al croquet, no digamos para ir por fósiles en un medio gélido y sin estructurar. El vehículo que la NASA ha puesto ya sobre Marte presenta tantas limitaciones que da pena: el pequeño *Sojourner* que soltó allí el *Pathfinder* recorrió 106 metros alrededor del punto de aterrizaje antes de que el *Pathfinder* interrumpiera la transmisión de datos. Y los mejores controladores de robots ambulantes ni siquiera rozan la inteligencia de una cucaracha.

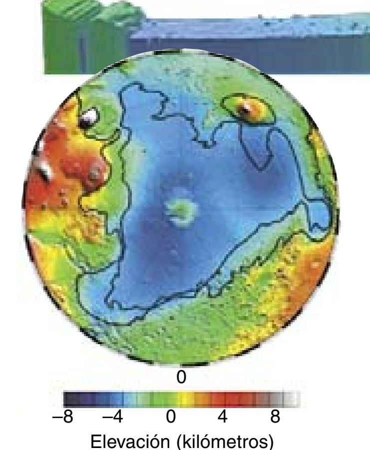
Una opción en principio interesante es la *telepresencia*. Consistiría en dotar a los robots de sensores y manipuladores que hiciesen las veces de los ojos, oídos y extremidades de los operadores humanos que los guiarían desde la Tierra. Desgraciadamente, el viaje de ida y vuelta de las comunicaciones con Marte dura 40 minutos. “La *telepresencia* no es factible”, recuerda Strudis; como mucho, “se puede lograr una especie de telerrobótica supervisada, que no bastaría” para un buen trabajo científico de campo.

Nadie ignora que las misiones espaciales humanas son caras. La cuenta en el caso de Marte va de los 20.000 millones de dólares, si se adoptara el plan ideado por Zubrin, hasta los 55.000 millones de dólares de la estimación actual de la NASA.

Aduce Zubrin que, si bien una misión humana sería costosa, también resultaría más rentable; enviar astronautas para que recojan muestras geológicas y las traigan a la Tierra decuplicaría la inversión en robots, pero la misión

3. UN VASTO OCEANO podría haber cubierto el polo norte de Marte. Su profundidad media habría sido de varios cientos de metros. Las líneas negras (*abajo, a la izquierda*) indican las posibles líneas de costa; la escala de color codificado representa la elevación del terreno, expresada en kilómetros. Una proyección plana de la elevación a lo largo de los cero grados de longitud (*abajo*) muestra que el polo sur de Marte está seis kilómetros más alto que el polo norte.





humana centuplicaría la cosecha de material procedente de una zona diez mil veces mayor.

Pero Arden L. Albee, del Instituto de Tecnología de California, esgrime una investigación realizada en 1986 por el Comité de Exploración del Sistema Solar de la NASA que estableció que una misión robótica podría haber recogido tantas muestras geológicas en la Luna como los tripulantes del *Apolo 15*. En un solo día, David R. Scott y James B. Irwin condujeron un vehículo a lo largo de 11,2 kilómetros y recogieron muestras en cinco puntos. Se trajeron 45 rocas, 17 muestras de tierra suelta y ocho "testigos" de tierra compacta. Un vehículo robótico podría haber hecho el mismo trabajo de los astronautas, concluyó el estudio, pero hubiera necesitado 155 días. La mayor parte de ese tiempo habría estado parado, mientras los expertos humanos deliberaran en la Tierra sobre cuál debería ser su movimiento siguiente. La recogida de muestras propiamente dicha habría llevado 70 días, en los cuales el vehículo habría estado en movimiento tan sólo 31 horas. Según Albee, si se contrastan los beneficios con los costes reales resulta difícil justificar el envío de seres humanos.

La cooperación en Marte

Con un territorio enorme, accidentes geológicos asombrosos y un clima inhóspito, parece que la conquista del planeta rojo sólo será posible a través de la combinación de recursos humanos y máquinas. A este respecto, Lee, de la NASA, dirige un proyecto en el cráter de impacto Haughton, de la isla de Devon, en el Artico canadiense. En el gélido y remoto desierto de la mayor isla deshabitada del mundo investigan las extraordinarias similitudes de la región con Marte y estudian procedimientos y técnicas que podrían emplearse en las futuras exploraciones del planeta.

En busca de muestras representativas y significativas, el grupo de Lee ha recorrido cientos de kilómetros y subido a un sinnúmero de afloramientos rocosos. "No hay un afloramiento patrón. Un robot no especializado sólo podría acceder a unos cuantos de los que hemos visitado."

"La exploración y el descubrimiento son un proceso extremadamente iterativo", prosigue Lee. "Sólo mediante la adaptabilidad y movilidad del hombre podemos aspirar a completarlo en un intervalo razonable de tiempo."

Se necesitarían máquinas semiautónomas que realizasen los trabajo demasiado tediosos o peligrosos para un ser humano, como los estudios del terreno y los reconocimientos aéreos, la creación de depósitos para las provisiones y de refugios para los viajes de campo muy prologados, o el transporte y almacenamiento de las enormes cantidades de muestras que recogerán los geólogos.

Steven W. Squyres, catedrático de Cornell e investigador principal del proyecto de construcción de vehículos para la recogida de muestras en Marte, piensa también en papeles complementarios para personas y robots. Sus ideas tomaron forma hace quince años, mientras participaba en un proyecto de estudio de la geología, sedimentación, biología y química de lagos antárticos. El entorno bajo el hielo era gélido, hostil, lejano, como en Marte. Para recoger los datos, el equipo de investigación utilizó vehículos de control remoto y equipos de submarinismo.

"La manera más eficaz de proceder era que bajase primero el vehículo de control remoto para que respondiera las preguntas de primer orden", explica Squyres. "Entonces, una vez sabíamos ya qué queríamos hacer, bajaba una persona." Añade que cuando se busque vida bajo la superficie de Marte las preguntas de primer orden serán éstas: "¿En qué punto se perforará y hasta qué profundidad?, ¿cómo es la corteza marciana?, ¿existe agua bajo la superficie? y, en caso afirmativo, ¿dónde se encuentra?" Squyres entiende que hay que enviar más misiones autónomas, no tripuladas, a Marte para obtener las respuestas.

Pese a que algunos defienden apasionadamente las justificaciones científicas del envío de seres humanos al planeta rojo, tendrá que haber además otras razones. El patriotismo, tradicionalmente el motor más fiable de las hazañas exploradoras, dista de ser un factor seguro, aunque sólo sea porque el proyecto es demasiado ambicioso para que un país quiera llevarlo a cabo por sí solo.

Es posible que las naciones industrializadas, incluida una Rusia más estable política y económicamente, quieran gloriarse de haber ido a Marte. Y conforme la actividad económica adquiere una creciente dimensión global, la exploración espacial podría beneficiarse de una nueva forma de patriotismo. Para sobresalir en el mundo, las multinacionales podrían contribuir con capital o técnica a cambio del valor publicitario de su vinculación a una misión a Marte o de los beneficios de participar en nuevas técnicas, de poseer los derechos de transmisión o de otros frutos secundarios.

Después de todo, de las Olimpiadas a la reciente circunnavegación de la Tierra en globo, son muchas las iniciativas que se han beneficiado del mecenazgo de las grandes empresas. Un proyecto de 55.000 millones de dólares las dejará pequeñas. Pero quizá llegue el momento en que parezca un precio mínimo que pagar a cambio de dejar una huella indeleble en la historia.

Cómo ir a Marte

Demostrado que no existe imposibilidad científica para una misión tripulada, el problema se circunscribe a escoger la opción técnica mejor y recabar los fondos necesarios para sufragar el viaje

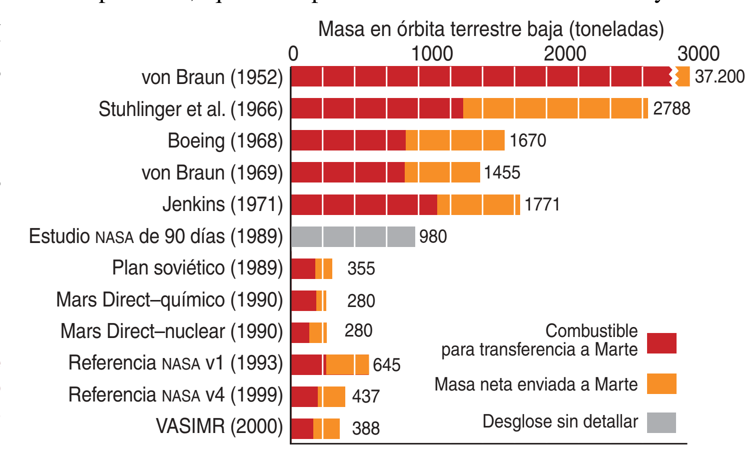
George Musser y Mark Alpert

La idea de un viaje a Marte podría parecer una aventura imposible. El planeta nunca se acerca a menos de 80 millones de kilómetros de la Tierra. Se tardarían años, quizás, en un viaje de ida y vuelta. Pero no es ése el sentir de científicos e ingenieros. Hay, dicen, soluciones para los desafíos técnicos que supondría una misión tripulada. No existe obstáculo mayor que el propio coste.

Depende éste de un número crucial, la masa de la nave. Un modelo ligero necesita menos combustible, partida principal de los gastos del vuelo. La historia del proyecto de una misión tripulada a Marte es la de un empeño por aliviar peso sin menoscabo de la seguridad y el interés científico. En 1952 Wernher von Braun imaginó una flotilla de naves espaciales propulsadas por cohetes químicos que pesaban 37.200 toneladas en el despegue. Sólo colocarlas en órbita terrestre costaría cientos de miles de millones de dólares. Desde entonces, se ha venido apurando hasta el máximo el coste pensando en cohetes electromagnéticos o nucleares de mayor rendimiento, reduciendo el número de tripulantes, evitando redundancias y fabricando combustible en el propio Marte.

El proyecto actual más sencillo es el *Mars Direct* ("A Marte sin Escalas") con un presupuesto estimado de 20.000 millones de dólares en costes iniciales, desglosados a lo largo de un decenio, más otros 2000 millones en cada misión. El plan de la NASA, la "misión de referencia," ha adoptado muchas ideas de *Mars Direct*, aunque dobla casi el presupuesto en aras de medidas adicionales de seguridad y más astronautas (seis en vez de cuatro).

En su versión más reciente el plan de la NASA prevé tres naves espaciales: un módulo de aterrizaje con carga sin tripulación, que transporta un vehículo de ascenso y



PESO de las misiones propuestas desde la órbita terrestre de partida, dato obligado para estimar los costes. Ha ido disminuyendo. Cada estimación de peso incluye vuelos con tripulación y carga.

LANZAMIENTO Y ENSAMBLAJE

En todas las propuestas para enviar el hombre a Marte, el primer paso crucial consiste en lanzar la nave hasta una órbita terrestre baja (de 200 a 500 km de altura). Mas cualquier nave tripulada que aplique las técnicas actuales de propulsión necesitará una cantidad enorme de combustible para llegar al planeta; pesará, por tanto, 130 toneladas al menos, si no el doble. No hay ahora vehículo de lanzamiento capaz de colocar en órbita esa masa. El transbordador y el Titán 4B, cohetes de gran empuje, tienen cargas útiles máximas inferiores a 25 toneladas. Además, a un coste de lanzamiento de 20 millones de dólares por tonelada, lo normal, la impulsión de una nave con destino a Marte resultaría prohibitiva.

Las compañías están desarrollando cohetes (así el Delta 4) con un mayor rendimiento económico y vehículos de lanzamiento reutilizables (el VentureStar), pero ninguno podría elevar una carga útil de 130 toneladas. Aunque sí podrían hacerlo el *Saturno 5* del programa *Apolo* o el cohete Energia de la antigua Unión Soviética, resucitar la producción de cualquiera de ellos sería poco práctico. Con toda probabilidad la nave tendría que lanzarse por etapas y ensamblarse después en órbita, mediante maniobras de acoplamiento, que se controlarían desde tierra. (No cabe pensar en ensamblarla en la Estación Espacial Internacional, porque la órbita

PROPULSORES DE COMBUSTIBLE SOLIDO
MOTOR DE LA ETAPA SUPERIOR
ADAPTADOR DE ETAPA
ESPACIO PARA LA CARGA UTIL
MOTORES RD-120
DEPOSITO DE HIDROGENO LIQUIDO
DEPOSITO DE OXIGENO LIQUIDO
CARENADO DE LA CARGA UTIL

1. COHETE MAGNUM, opción económica para lanzar la nave que transportaría los primeros astronautas hasta Marte. Aprovechando las rampas de lanzamiento y los propulsores de combustible sólido del transbordador, podría poner 80 toneladas en órbita terrestre.

una planta de combustible hasta la superficie marciana; un módulo de aterrizaje con un habitáculo sin ocupar, que se coloca en órbita marciana; y un vehículo de transferencia de tripulación (CTV), que, si los dos primeros alcanzan su objetivo, despega cuando la Tierra y Marte se alineen de nuevo, 26 meses después de los primeros lanzamientos. El CTV transporta a los astronautas hasta Marte y se acopla con el módulo de aterrizaje con habitáculo. La tripulación transborda, desciende a la superficie, permanece allí 500 días y regresa en el vehículo de ascenso. El CTV, que les esperaría en órbita, les traería de vuelta a casa. Cada 26 meses despegaría otro trío de naves, hasta crear la infraestructura para un asentamiento permanente.

Los costes estimados importan menos que los de la Estación Espacial Internacional o el programa Apolo. Considerada la proverbial informalidad de la NASA en ceñirse a las estimaciones, la Mars Society y la National Space Society han buscado otros caminos.

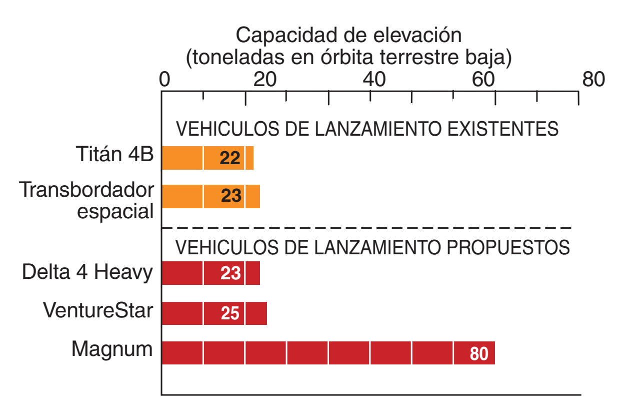
Tal es el trabajo de ThinkMars, un grupo del Instituto de Tecnología de Massachusetts y la Escuela de Economía de Harvard. En su plan, el más elaborado, proponen crear una empresa al frente del proyecto, que contrate las tareas con compañías privadas y centros de la NASA. La administración norteamericana y de otros países comprarían plazas o espacio de carga en la nave a un precio reducido. La diferencia se compensaría con la venta de publicidad y derechos de imagen y con concesiones de explotación de desarrollos técnicos.



de la estación tiene una inclinación de 51,6 grados; desde las instalaciones de Cabo Cañaveral es más fácil poner en órbita cargas útiles con una inclinación de 28,5 grados.) El transbordador podría transferir la tripulación hasta la nave, una vez terminada ésta.

Para simplificar el ensamblaje, tendría que minimizarse el número de lanzamientos y encuentros orbitales. Puesto que el Centro Marshall de Vuelos Espaciales de la NASA en Huntsville ha diseñado el cohete Magnum, capaz de poner en órbita 80 toneladas, bastaría un par de lanzamientos para preparar una nave de 130 toneladas con destino a Marte. El Magnum puede usar las mismas rampas de lanzamiento y cohetes de combustible sólido que el transbordador espacial. Los propulsores de éste se unirían a un nuevo cohete de doble etapa alimentado por tres motores RD-120. El Magnum podría transportar una carga útil de 28 metros de longitud; la envuelta de la etapa superior serviría de escudo térmico de la nave.

Como el Magnum aprovecharía los propulsores y las instalaciones de lanzamiento existentes, sus costes de desarrollo serían de unos 2000 millones de dólares y de dos millones de dólares por tonelada en cada lanzamiento. Se podría construir incluso el Ares, un vehículo de mayor potencia, a partir de los componentes del transbordador y que utilizaría un motor de gran empuje en la etapa superior para colocar la nave tripulada directamente en la trayectoria hacia Marte.



2. LOS ACTUALES vehículos de lanzamiento no satisfacen las exigencias de una misión tripulada. Para poner en órbita terrestre una nave de 130 toneladas con destino a Marte se necesitarían seis lanzamientos del Titán 4B, transbordador espacial, Delta 4 Heavy o VentureStar, por sólo dos del Magnum.

SISTEMA DE PROPULSION

¿Cómo impulsar una nave tripulada desde la órbita terrestre hasta Marte? Ante las varias opciones, cada una con sus ventajas e inconvenientes, hemos de buscar un compromiso entre el empuje del cohete y el rendimiento de su combustible. Los sistemas de gran empuje aceleran con rapidez y consumen más combustible; los de bajo empuje tardan en acelerar y ahorran combustible. Podrían usarse ambos tipos en fases diferentes de una misión. Los cohetes de gran empuje pueden transportar rápidamente a los astronautas, mientras que los de bajo empuje se aplicarían en misiones más lentas de carga o naves sin tripulación.

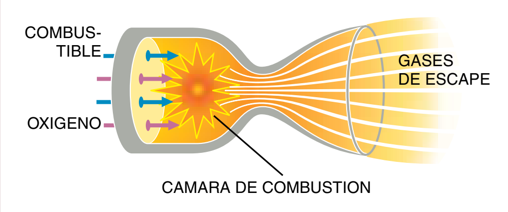
CODIGO DE ILUSTRACIONES

AGENTE PROPULSOR
CORRIENTE ELECTRICA
CAMPO MAGNETICO
OXIGENO

QUIMICO

Casi todas las naves espaciales lanzadas hasta la fecha han utilizado propulsores químicos, que queman hidrógeno y oxígeno y aprovechan los gases de expansión para proporcionar empuje. Es una técnica contrastada y produce más empuje que la mayoría de otros métodos, aunque con menor rendimiento. Los cohetes químicos necesitarían cantidades prodigiosas de combustible para impulsar una nave tripulada hasta Marte. Hay un proyecto que prevé una nave de 233 toneladas que comenzaría el viaje con 166 toneladas de hidrógeno y oxígeno líquido. Sus siete motores RL-10 se dispondrían en tres etapas de propulsión. La primera impulsaría la nave hasta una órbita elíptica alta alrededor de la Tierra, la segunda colocaría la nave en una trayectoria hacia Marte y la tercera impulsaría a la nave de regreso a la Tierra. Cada etapa se activaría durante unos minutos y después se eliminaría.

Empuje: 110.000 newton
Velocidad de gases de escape: 4,5 km por seg.
Patrón de tiempo de combustión: 21 minutos
Patrón de relación de combustible: 55 %



TERMONUCLEAR

Los cohetes termonucleares del programa Rover/NERVA, construidos en los años sesenta, proporcionan empuje haciendo fluir hidrógeno líquido a través de un reactor nuclear de núcleo sólido; el hidrógeno se calienta hasta más de 2500 grados centígrados y escapa a través de la tobera del cohete a gran velocidad. La propulsión nuclear proporciona el doble de impulso por kilogramo de combustible en comparación con los mejores cohetes químicos; además, los reactores generan electricidad para la nave. Un vehículo tripulado de 170 toneladas que contenga tres cohetes nucleares y unas 90 toneladas de hidrógeno líquido podría alcanzar Marte en seis o siete meses.

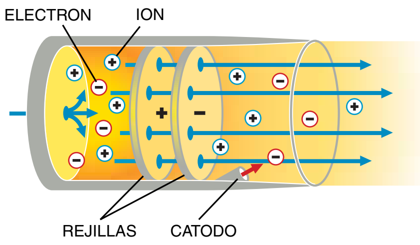
HIDROGENO
BARRA DE COMBUSTIBLE DEL REACTOR

Empuje: 67.000 newton
Velocidad de gases de escape: 9 km por seg.
Patrón de tiempo de combustión: 27 minutos
Patrón de relación de combustible: 32 %

IONICO

Desarrollada en los años cincuenta, la propulsión iónica es técnica que usa campos eléctricos en vez de calor para expulsar el agente propulsor. El combustible gaseoso, como cesio o xenón, fluye en una cámara y se ioniza con un cañón de electrones. La diferencia de potencial entre dos rejillas metálicas extrae los iones dotados de carga positiva, que salen a través de la rejilla hacia el espacio. Mientras tanto, un cátodo de la parte trasera del motor inyecta electrones en el haz iónico; la nave no acumula, pues, carga negativa. Hace poco más de un año la sonda *Deep Space 1* realizó la primera prueba interplanetaria de este sistema. Consumió 2,5 kilowatt de energía solar y produjo un empuje pequeño, aunque constante, de 0,1 newton. Sin embargo, las rejillas —que aceleran las partículas pero también están en su camino— no se pueden aumentar hasta los niveles de megawatt necesarios para las misiones tripuladas a Marte. Un motor iónico grande habría de extraer su energía de reactores nucleares; los paneles solares capaces de producir más de 100 kilowatt serían poco manejables.

Empuje: 30 newton
Velocidad de gases de escape: 30 km por seg.
Patrón de tiempo de combustión: 79 días
Patrón de relación de combustible: 22 %

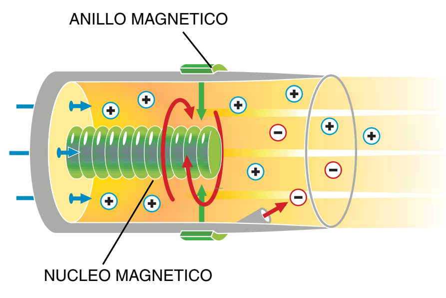


FUENTE: JAMES S. SOVEY *NASA Centro de Investigación Glenn*

EFECTO HALL

Los impulsores de efecto Hall utilizan también un campo eléctrico para catapultar partículas dotadas de carga positiva (xenón). Un anillo magnético genera un campo magnético radial, que hace que los electrones giren en círculos alrededor del anillo, cuyo movimiento crea un campo eléctrico axial. La belleza del sistema reside en que no necesita rejillas, lo que haría que fuese más fácil aumentarlo que en el caso de la impulsión iónica. El rendimiento se podría aumentar añadiendo una segunda fase impulsora. La versión más reciente de los impulsores de efecto Hall, un proyecto conjunto ruso-estadounidense, consume unos 5 kilowatt y genera 0,2 newton de empuje.

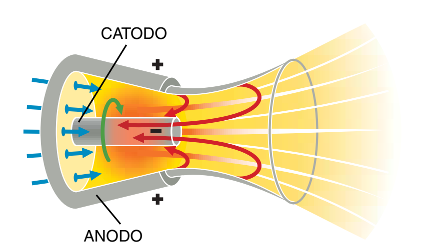
Empuje: 30 newton
Velocidad de gases de escape: 15 km por seg.
Patrón de tiempo de combustión: 90 días
Patrón de relación de combustible: 38 %



FUENTE: JAMES S. SOVEY *NASA Centro de Investigación Glenn*

MAGNETOPLASMADINAMICO (MPD)

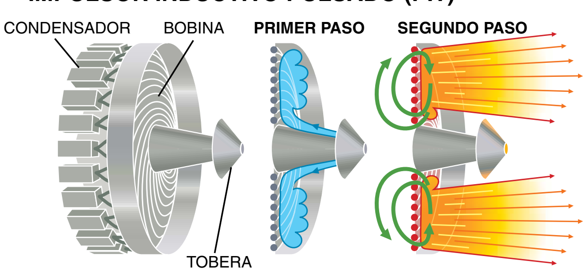
Los cohetes MPD aceleran partículas cargadas utilizando campos magnéticos. El dispositivo consiste en un canal formado por un ánodo, con un cátodo en forma de vástago situado en el centro. La diferencia de potencial entre ambos electrodos ioniza el combustible; fluye una intensa corriente eléctrica radialmente a través del gas y por el cátodo. En el cátodo, la corriente genera un campo magnético circular que interacciona con la corriente en el gas para acelerar las partículas en una dirección perpendicular a ambas, es decir, axialmente. El combustible puede ser argón, litio o hidrógeno, en orden ascendente de rendimiento. Adoptando investigaciones realizadas en diversos centros, la NASA ha construido un prototipo de un megawatt en el que la corriente llega en pulsos de dos milisegundos.



Empuje: 100 newton
Velocidad de gases de escape: 20 a 100 km por seg.
Patrón de tiempo de combustión: 21 a 25 días
Patrón de relación de combustible: 6,7 a 31 %

FUENTE: MICHAEL R. LAPOINTE *NASA Centro de Investigación Glenn*

IMPULSOR INDUCTIVO PULSADO (PIT)



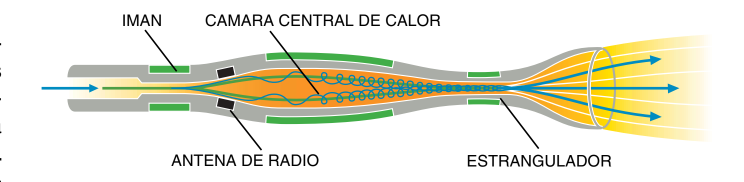
El dispositivo cuenta con una secuencia rápida de sucesos que establece campos eléctricos y magnéticos perpendiculares, como en el caso del MPD. Todo comienza cuando una tobera libera una bocanada de gas (argón), que se esparce sobre la superficie de una bobina plana de hilo conductor de un metro de diámetro. Una batería de condensadores descarga entonces en la bobina un pulso de corriente, que dura unos 10 microsegundos. El campo magnético radial generado por el pulso induce un campo eléctrico circular en el gas, ionizándolo y haciendo que las partículas giren en dirección contraria al pulso original de corriente. Como su movimiento es perpendicular al campo magnético, son empujadas hacia el espacio. A diferencia de otros motores electromagnéticos, el PIT no necesita electrodos, propensos al desgaste; puede incrementarse su potencia avivando la frecuencia de los pulsos. En un sistema de un megawatt, los pulsos se producirían a una frecuencia de 200 veces por segundo.

Empuje: 20 newton
Velocidad de gases de escape: 50 km por seg.
Patrón de tiempo de combustión: 110 días
Patrón de relación de combustible: 14 %

FUENTE: ROBERT VONDRA *TRW*, RALPH H. LOVBERG *Universidad de California, San Diego* Y C. LEE DAILEY

VASIMR

El Cohete de Magnetoplasma con Impulso Variable Específico (VASIMR) cubre el intervalo que separa los sistemas de gran y bajo empuje. El combustible (hidrógeno) se ioniza primero con ondas de radio y después se guía hacia una cámara central entretejida con campos magnéticos. Ahí las partículas describen espirales alrededor de las líneas de campo magnético con cierta frecuencia natural. Bombardeando las partículas con ondas de radio de la misma frecuencia, el sistema las calienta hasta diez millones de grados. Una tobera magnética convierte el movimiento espiral en axial, produciendo empuje. Regulando la forma de calentamiento y ajustando un estrangulador magnético, el piloto controla la tasa de expulsión. El mecanismo recuerda el cambio de marchas de un coche. Cerrando el estrangulador, el cohete se pone en una marcha larga: reduce el número de partículas que salen (el empuje), pero mantiene alta su temperatura (la velocidad de los gases de escape). La apertura corresponde a una marcha corta: gran empuje pero poco rendimiento. Una nave espacial utilizaría una marcha corta y combustión retardada para elevarse hasta la órbita terrestre y después subiría de marcha para el viaje interplanetario. La NASA planea un vuelo de prueba de un dispositivo de diez kilowatt en 2004; las misiones a Marte necesitarían diez megawatt.



	Marcha corta	Marcha larga
Empuje:	1200 newton	40 newton
Velocidad de gases de escape:	10 km por seg.	300 km por seg.
Patrón de tiempo de combustión:	2,1 días	53 días
Patrón de relación de combustible:	46 por ciento	2,4 por ciento

FUENTE: FRANKLIN CHANG-DIAZ *NASA Centro espacial Johnson*

VELAS SOLARES

Las velas solares llevan hasta el límite el compromiso entre empuje y rendimiento. Las arrastra la suave presión de la luz solar, aunque débil, gratis. Para transportar 25 toneladas de la Tierra a Marte en un año, una vela tendría que tener al menos un tamaño de cuatro kilómetros cuadrados. Su material debe presentar una densidad inferior a un gramo por metro cuadrado. Las fibras de carbono casi alcanzan esa ligereza. El reto siguiente será desplegar esa estructura tan frágil. En 1993 Regata Espacial, un consorcio ruso, desplegó el espejo espacial Znamya de 300 metros cuadrados, que en 1999 se enredó en una segunda prueba. La NASA subvencionó recientemente una idea análoga de una "vela" magnética para captar el viento solar (partículas cargadas que fluyen procedentes del Sol).

Empuje: 9 newton por km^2 (a una distancia terrestre del Sol)
Velocidad de gases de escape: no aplicable
Patrón de tiempo de combustión: 58 días

VOCABULARIO TECNICO

Empuje: fuerza que un cohete podría proporcionar en una misión a Marte, medida en newton.

Velocidad de gases de escape: medida del rendimiento del combustible.

Patrón de tiempo de combustión: tiempo que debe activarse el cohete para acelerar una carga útil de 25 toneladas desde una órbita terrestre baja hasta la velocidad de escape. El tiempo guarda una relación inversa con el empuje.

Patrón de relación de combustible: fracción de la masa total de la nave espacial ocupada por el combustible. La cantidad de combustible guarda una relación exponencial con la velocidad de los gases de escape.

¿QUE CAMINO SEGUIR?

CONDICIONES DE CONJUNCION

Para los cohetes de gran empuje, el camino para llegar a Marte con menos combustible se llama transferencia de Hohmann. Se trata de una elipse que apenas roza las órbitas de la Tierra y Marte. La nave despega cuando Marte precede a la Tierra en un ángulo de unos 45 grados (lo que sucede cada 26 meses). Se desliza hacia el exterior y alcanza Marte en el lado opuesto al Sol con respecto a la posición original de la Tierra. Se denomina conjunción esta configuración planetaria.

Para regresar, los astronautas esperan hasta que Marte esté unos 75 grados por delante de la Tierra, se lanzan en un arco hacia el interior y dejan que la Tierra les alcance.

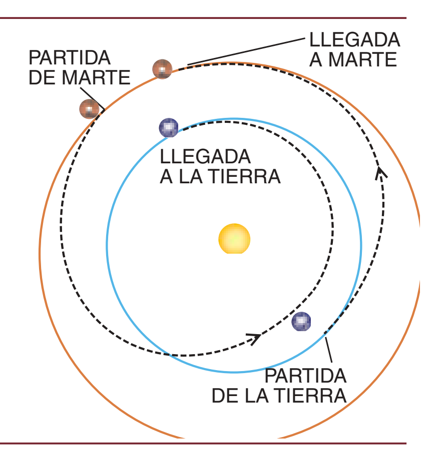
Cada tramo necesita dos empujes de aceleración. Desde la Tierra, un impulso de velocidad de unos 11,5 km/seg libera de la atracción del planeta y se entra en la órbita de transferencia. Alternativamente, partiendo desde una órbita terrestre baja, donde la nave se mueve ya con rapidez, los motores deben impartir unos 3,5 km/seg. (Desde una órbita lunar el impulso sería incluso menor. No obstante, los proyectos ignoran a nuestro satélite ya que es un desvío innecesario y costoso.) En Marte los retrocohetes o aerofrenos deben frenar la nave en 2 km/seg para entrar en órbita o 5,5 km/seg para aterrizar. En el tramo de regreso se invierte esta secuencia.

El viaje completo dura algo más de dos años y medio: 260 días para cada viaje interplanetario y 460 días en Marte. En la práctica, como las órbitas planetarias son elípticas e inclinadas, la trayectoria óptima puede ser ligeramente más corta o larga. Los planes más avanzados, como *Mars Direct* o la misión de referencia de la NASA, están a favor de las misiones en condiciones de conjunción, pero acelerando el viaje quemando pequeñas cantidades suplementarias de combustible. Una cuidadosa planificación puede asegurar también que la nave regrese a la Tierra naturalmente si los motores fallan.

PARTIDA DE MARTE
PARTIDA DE LA TIERRA
LLEGADA A MARTE
LLEGADA A LA TIERRA

CONDICIONES DE OPOSICION

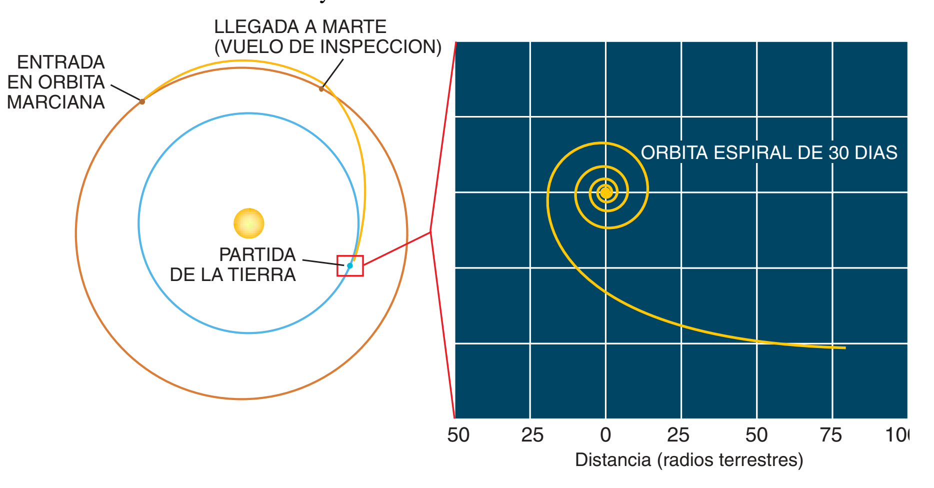
Para que el viaje sea corto, la NASA ha venido considerando trayectorias en condiciones de oposición, llamadas así porque la Tierra realiza su mayor acercamiento a Marte —configuración de oposición— en el transcurso de la misión. Tales trayectorias implican un impulso suplementario de aceleración, suministrado en ruta. Un viaje normal duraría año y medio: 220 días en llegar al destino, 30 días en Marte y 290 días de regreso. En el retorno, la nave se encamina hacia el Sol, basculando quizá por Venus, para aproximarse a la Tierra por detrás. Puede invertirse la secuencia de hitos para que el tramo de viaje hacia el exterior sea el más largo. Aunque estas trayectorias se han ido abandonando —un viaje demasiado largo para estancia tan corta— podrían adaptarlas cohetes nucleares ultrapotentes o planes “en ciclos”, en los que la nave va y viene sin parar entre los planetas.



BAJO EMPUJE

Los cohetes de bajo empuje, como el de impulsión iónica, aunque ahorran combustible, son demasiado débiles para liberarse de la gravedad terrestre en un solo intento. Deben abrir lentamente sus órbitas, trazando una espiral hacia fuera. En alcanzar la velocidad de escape podrían tardar un año, que para la tripulación es mucho tiempo de exposición a los cinturones de radiación de Van Allen. Se piensa en usar cohetes de bajo empuje para transporte exclusivo de carga. También, en llevar una nave vacía hasta el punto de escape, transportar los astronautas en un “taxi de escape” parecido al transbordador espacial y activar entonces otro cohete para la impulsión final hasta Marte. El segundo cohete podría ser de gran o bajo empuje. En el marco de la última opción, se activa durante 40 días un impulsor inductivo pulsado, se deja inercialmente otros 85 días y torna a encenderse otros 20 días al llegar al planeta rojo.

El motor VASIMR abre nuevas opciones. Permaneciendo en una marcha corta (empuje moderado y bajo rendimiento), puede trazar una espiral hacia el exterior de la Tierra en 30 días. El combustible de reserva protege a los astronautas de la radiación. El viaje interplanetario dura otros 85 días. En la mitad primera, se aviva la marcha del cohete; en el punto medio comienza a frenar reduciendo marcha. Al llegar a Marte, se desprende parte de la nave y aterriza, mientras que el resto —incluido el módulo para el vuelo de regreso— sobrevuela el planeta, continúa frenando y entra en órbita 131 días más tarde.

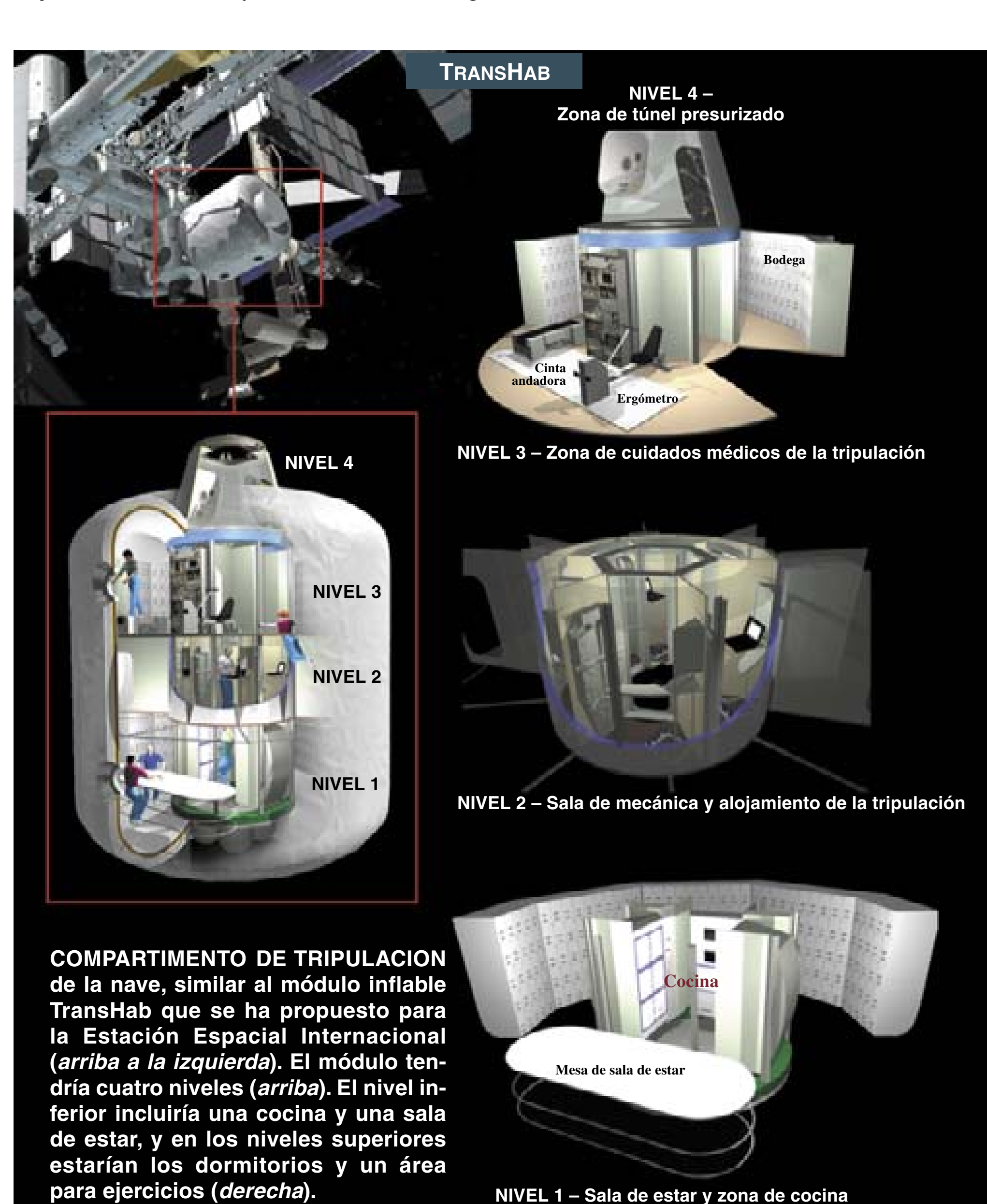


Lo principal para la seguridad de la tripulación serán los sistemas de mantenimiento de la vida de la nave. En el Centro Espacial Johnson de Houston se trabaja en la mejora del rendimiento y la fiabilidad de los sistemas. Se ha recurrido a voluntarios que han pasado tres meses en una cámara cerrada diseñada para someter a prueba el reciclado de aire y agua. Además de los métodos físicos y químicos, el experimento abarcaba la regeneración biológica: conversión de los desperdicios sólidos en abono para cultivar trigo, que proporcionaba oxígeno y pan recién hecho a los voluntarios.

Se estudia reducir al mínimo los efectos sobre la salud de una prolongada exposición a un medio de ingravidez. Los astronautas que han pasado varios meses en órbita terrestre han perdido cantidades significativas de masa ósea. Para evitar la atrofia podría hacerse rotar lentamente la nave en su viaje interplanetario hacia Marte. Según el proyecto que consideremos, un cable u otra estructura une la cápsula de tripulación a un contrapeso; por ejemplo, la etapa o fase de cohete usada. La aplicación de una rotación por minuto alrededor de un brazo de giro de 340 metros de longitud simularía la fuerza gravitatoria de 0,38 g en la superficie del planeta rojo. Doblando la velocidad se disminuye el brazo de giro necesario en un factor de cuatro, pero empeora la fuerza de Coriolis, que provocaría el balanceo de los astronautas en el interior de la nave. Pero la rotación de la nave durante el vuelo complicaría los procedimientos de comunicaciones y maniobras. Por su lado, los clínicos buscan alternativas en el régimen de ejercicios, suplementos alimenticios y sillas centrífugas.

Preocupa también la radiación. La tripulación estaría expuesta a rayos cósmicos (iones de alta energía que fluyen constantemente a través de nuestra galaxia) y a las fulguraciones solares (intenso flujo de protones que el Sol expulsa periódicamente). Los rayos cósmicos son más energéticos que los protones de las fulguraciones solares; por eso mismo, cuesta más bloquearlos. En el espacio, un astronauta absorbería 75 rems por año; a bordo de una nave espacial, detrás de una pared de aluminio de seis centímetros de espesor, la dosis sería un 20 por ciento menor. (Un apantallamiento adicional no acarrea mayor beneficio. Hasta en la superficie marciana recibirán esta dosis.) Se admite, sin embargo, que esta dosis anual sólo aumentaría en un pequeño porcentaje la probabilidad de que un astronauta muera de cáncer al cabo de 30 años. Unas píldoras antioxidantes podrían amortiguar el riesgo.

La radiación de las fulguraciones solares supone una amenaza mayor. Se produce en explosiones impredecibles, que podrían suministrar 4000 rems a la piel y 200 rems a los órganos internos en una dosis mortal. Al menos una de estas tormentas tiene lugar cerca del máximo de cada ciclo solar de once años; tormentas menores, aunque potentes, hacen erupción cada dos años. Los astronautas en órbita terrestre baja están protegidos por el campo magnético de nuestro planeta, que atrapa y desvía los protones incidentes; los que viajan hacia la Luna y Marte carecen de esta protección. Pero las partículas pueden bloquearse con facilidad. Ofrecen óptima protección los materiales ricos en hidrógeno como el polietileno y el agua; los átomos más pesados no son tan eficaces, porque el choque de protones puede liberar neutrones de los átomos, desencadenando una peligrosa cascada de radiación. Una capa de agua de 10 centímetros reduce la dosis a 20 rems. Se ha propuesto la creación de un refugio en la nave a Marte para las tormentas de fulguraciones solares almacenando el agua de la tripulación en bolsas que rodeen la zona de descanso. Los satélites de observación solar podrían avisar a los astronautas de las fulguraciones inminentes.



COMPARTIMENTO DE TRIPULACION de la nave, similar al módulo inflable TransHab que se ha propuesto para la Estación Espacial Internacional (*arriba a la izquierda*). El módulo tendría cuatro niveles (*arriba*). El nivel inferior incluiría una cocina y una sala de estar, y en los niveles superiores estarían los dormitorios y un área para ejercicios (*derecha*).

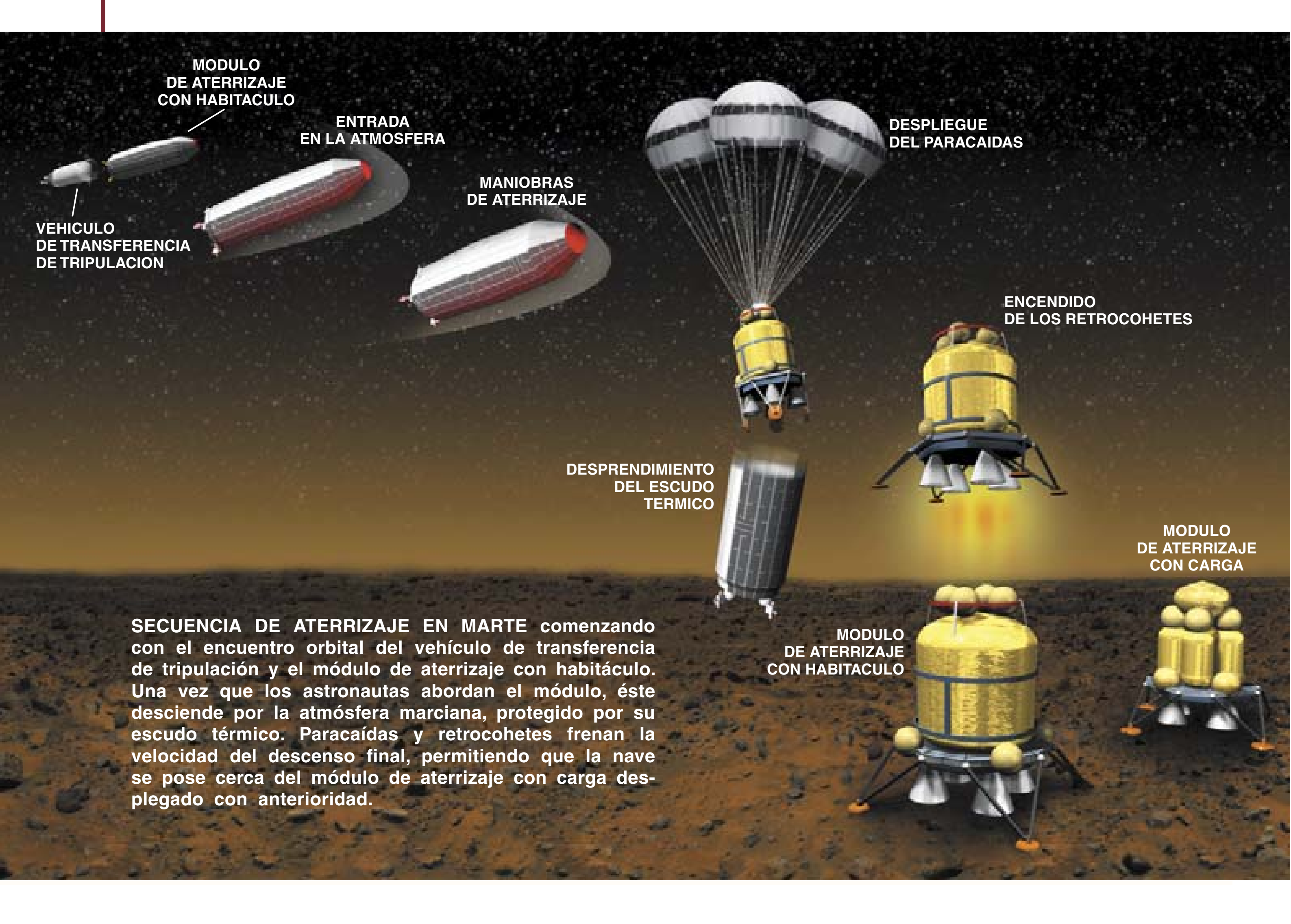
DESCENSO Y ASCENSO

El aterrizaje en Marte será harto más difícil que los alunizajes de las misiones *Apolo*. A diferencia de la Luna, el planeta tiene atmósfera; su gravedad dobla la lunar. Además, el módulo de aterrizaje tendría una masa mucho mayor que los módulos lunares, porque transportaría el habitáculo donde vivirían los astronautas durante 500 días sobre la superficie.

Sólo tres robots han aterrizado con éxito sobre el planeta: *Viking* 1 y 2 en 1976 y *Mars Pathfinder* en 1997. Todos emplearon escudos térmicos, paracaídas y retrocohetes para frenar la velocidad de descenso. (*Pathfinder* también usó cojines de aire para amortiguar el aterrizaje.) Un módulo de aterrizaje tripulado, aunque de geometría diferente, seguiría la misma secuencia. El robot se asentaba en escudos térmicos con forma de plato y se lanzaba incontroladamente a través de la atmósfera marciana. Pero la nave tripulada tendría que guiarse con exactitud durante el descenso, porque habría de aterrizar muy cerca del vehículo de carga sin tripulación, que habría llegado con anterioridad.

La NASA prevé un módulo de aterrizaje con forma de bala envuelto por una cubierta que le sirve de escudo térmico. De acuerdo con el proyecto, primero se enviará el módulo sin tripulación. Se colocará en órbita por aerofrenado contra la atmósfera de Marte. El módulo persistirá en órbita hasta que los astronautas lleguen en el vehículo de transferencia. Una vez que los astronautas hayan subido a bordo del módulo de aterrizaje, éste descenderá a la manera del transbordador, con el morro erguido. El piloto podrá guiar la nave hacia el lugar de aterrizaje. Los paracaídas decelerarán la velocidad de descenso; se activarán los retrocohetes, permitiendo que el piloto sitúe la nave en el punto exacto.

Transcurridos 500 días, empezará el regreso. Los astronautas subirán a un vehículo de ascenso, que despegará de la superficie hasta el encuentro orbital con el vehículo de transferencia, encargado de traerlos a la Tierra. En la primera misión tripulada, habrá un vehículo de ascenso, repleto de combustible, unido al módulo de aterrizaje con habitáculo. En misiones posteriores, los vehículos de ascenso se desplegarían y usarían combustible fabricado en Marte. Una unidad de producción de combustible del tamaño aproximado de un gran automóvil podría combinar hidrógeno líquido traído de la Tierra con dióxido de carbono de la atmósfera marciana. A través de una serie de reacciones químicas se produciría agente propulsor (metano y oxígeno líquidos), así como agua adicional y aire respirable para la tripulación.



SECUENCIA DE ATERRIZAJE EN MARTE comenzando con el encuentro orbital del vehículo de transferencia de tripulación y el módulo de aterrizaje con habitáculo. Una vez que los astronautas abordan el módulo, éste desciende por la atmósfera marciana, protegido por su escudo térmico. Paracaídas y retrocohetes frenan la velocidad del descenso final, permitiendo que la nave se pose cerca del módulo de aterrizaje con carga desplegado con anterioridad.

¿COMO SERA?

En cuanto desembarquen, sabrán los astronautas que han llegado a un mundo extraño. Notarán los efectos de una gravedad más débil al dar el primer paso. Andar es como hacer oscilar un péndulo, cuyo período está relacionado con la magnitud de la gravedad. Por eso, tenderán a caminar alrededor de un 60 por ciento más rápido que en la Tierra y quemarán así la mitad de calorías. Un paseo informal terrestre viene a ser una carrera en Marte.

En su atmósfera tenue —la terrestre a unos 35 kilómetros de altura—, temperatura y presión fluctúan amplia y rápidamente, pero las pautas climáticas acostumbran ser uniformes de un lugar a otro. Aunque el viento alcanza ráfagas de 100 km por hora, la fuerza que ejerce es pequeña. Los astronautas pueden ver niebla, escarcha y tenues nubes azules por la mañana temprano. El cielo cambia de color dependiendo de cuándo y adónde se mira. Al mediodía y hacia el horizonte, la dispersión del polvo lo hace rojo. A la salida y la puesta del sol es azul; en otras partes el cielo es amarillento. Debido a la proporción variable de luz solar directa y brillo indirecto del cielo, la coloración de las rocas parece diferente según la hora del día.

Marte es llano hasta la exasperación. Los "Picos gemelos" del punto de aterrizaje del *Mars Pathfinder* tienen una altura de 50 metros. Se les distingue a un kilómetro de distancia. El propio Olympus Mons, la mayor montaña del sistema solar, tiene una pendiente de un pequeño porcentaje. La topografía adquiere interés cuando parece dibujar cañones en el borde del Valles Marineris.

Gracias a su llanura, los astronautas podrán ver que Marte es menor que la Tierra: la distancia al horizonte es proporcional a la raíz cuadrada del radio de un planeta. Dos personas de 1,70 metros de altura se percibirían a una distancia de siete kilómetros. En la Tierra raramente se observa el horizonte teórico porque se interpone la topografía. El horizonte también es el límite de las comunicaciones directas por radio en Marte, que carece de ionosfera. Los astronautas necesitarán satélites repetidores.





YOGI, roca fotografiada por la sonda *Mars Pathfinder* en 1997. No parece la misma al amanecer (*izquierda*) que por la tarde (*derecha*), debido a los caprichos de la luz marciana.

POLVO

Las partículas, muy finas, constituyen quizás el mayor enemigo del viajero. No hay en Marte agua líquida que limpie las partículas finas en la Tierra. El planeta rojo está cubierto de polvo con un tamaño medio de grano de aproximadamente dos micras, que se adherirá al traje espacial, arañará los visores de los cascos, producirá cortocircuitos eléctricos, erosionará los instrumentos y taponará los motores. En la Luna, con similar polvillo, los trajes no duraban más de dos días antes de que sufrieran las primeras fugas. Además, los análisis de la sonda *Viking* sugieren que las partículas están revestidas de peróxido de hidrógeno y otros productos químicos corrosivos. Aunque sus concentraciones son bajas, estas toxinas podrían desgastar las juntas de elastómeros.

De los resultados del *Mars Pathfinder* se infiere que sería cuarzo una pequeña fracción de las partículas. Su inhalación provocaría silicosis, una enfermedad incurable del pulmón. Para mantener el habitáculo libre de polvo, los astronautas tendrían que limpiarse exhaustivamente antes de entrar, tarea nada fácil. Al estar magnetizado y eléctricamente cargado, el polvo se adhiere a todo, y habrá una reserva limitada de agua. Los astronautas se podrían restregar con hielo seco condensado en la atmósfera. También podrían llevar trajes espaciales de doble capa; la exterior se dejaría fuera, en un compartimiento estanco especial.

La energía eléctrica constituye otro problema. En *Mars Pathfinder*, la producción de los paneles solares caía un uno por ciento cada tres días por culpa del polvo acumulado. Una tormenta oscurecería los cielos y reduciría a la mitad la producción de energía. Habría que pensar en un reactor nuclear de 100 kilowatt.

PROTECCION PLANETARIA

Los microorganismos acompañarán a los viajeros, complicando la búsqueda de vida marciana autóctona. Y cualquiera que hubiera allí podrían traerlo a la Tierra. Probablemente no producirían enfermedades en los humanos ni otras especies, pero el riesgo de un desastre total no es nulo. Aunque la NASA está desarrollando un sistema de aislamiento biológico para las misiones de robots con toma de muestras, no hay una forma equivalente de descontaminar al astronauta. Los procedimientos de cuarentena durante el programa *Apolo* fueron incómodos y defectuosos. Y controvertidos. Si los astronautas se ponen enfermos, ¿hay que impedir su regreso a la Tierra basándose en la posibilidad de que hayan contraído una enfermedad alienígena? De acuerdo con la doctrina oficial, habría que dirimir la cuestión de la existencia de vida extinta o latente en Marte antes de enviar astronautas.

1 A MARTE SIN ESCALAS

Podemos llegar a Marte con una nave de moderadas dimensiones, lanzada por cohetes impulsores dotados de la misma técnica que llevó a los astronautas a la Luna hace treinta años

Robert Zubrin

"El espacio está ahí, y vamos a conquistarlo." Con estas palabras, John F. Kennedy formulaba en 1962 su propósito de enviar un norteamericano a la Luna en ese decenio. Pero durante los 30 años transcurridos desde el último alunizaje del *Apolo*, el programa espacial estadounidense ha carecido, en general, de una idea clara sobre el siguiente objetivo al que aspirar. Y es muy sencilla: la exploración y colonización de Marte.

No es un objetivo inaccesible. Ni se precisa una nave gigantesca con un equipamiento exótico. De hecho, disponemos ya de la técnica necesaria para enviar el hombre a Marte. Podemos llegar allí con una nave de moderadas dimensiones, lanzada por cohetes impulsores dotados de la misma técnica que llevó a los astronautas a la Luna hace un cuarto de siglo largo. La clave del éxito reside en la estrategia empleada por los primeros exploradores de nuestro propio hemisferio: viajar ligero de equipaje y vivir del suelo que se pisa. La primera misión tripulada podría alcanzar el planeta en el plazo de un decenio. Expondré el funcionamiento del proyecto "A Marte sin Escalas", como he bautizado nuestra propuesta.

Estamos en el año 2005. Desde Cabo Cañaveral se lanza un cohete propulsor de gran empuje con una capacidad igual a la de los *Saturno 5* de la era *Apolo*. Cuando la nave arriba a cierta altura de la atmósfera terrestre, la etapa superior del cohete se desprende del propulsor agotado, enciende su motor e impulsa una carga autónoma (no tripulada), de 45 toneladas, en una trayectoria hacia Marte.

Esta carga es el Vehículo de Retorno a la Tierra, o VRT. Se ha construido con el propósito de traer de regreso a los astronautas desde Marte. Pero en este viaje no hay hombres a bordo; el VRT sólo porta un cargamento de seis toneladas de hidrógeno líquido, un conjunto de compresores, una unidad automatizada de procesamiento químico, varios vehículos de exploración científica y un reactor nuclear de 100 kilowatt montado en la parte trasera de un vehículo mayor propulsado por una mezcla de metano y oxígeno. Los tanques de metano y oxígeno del VRT, que se utilizarán para el regreso, están vacíos.

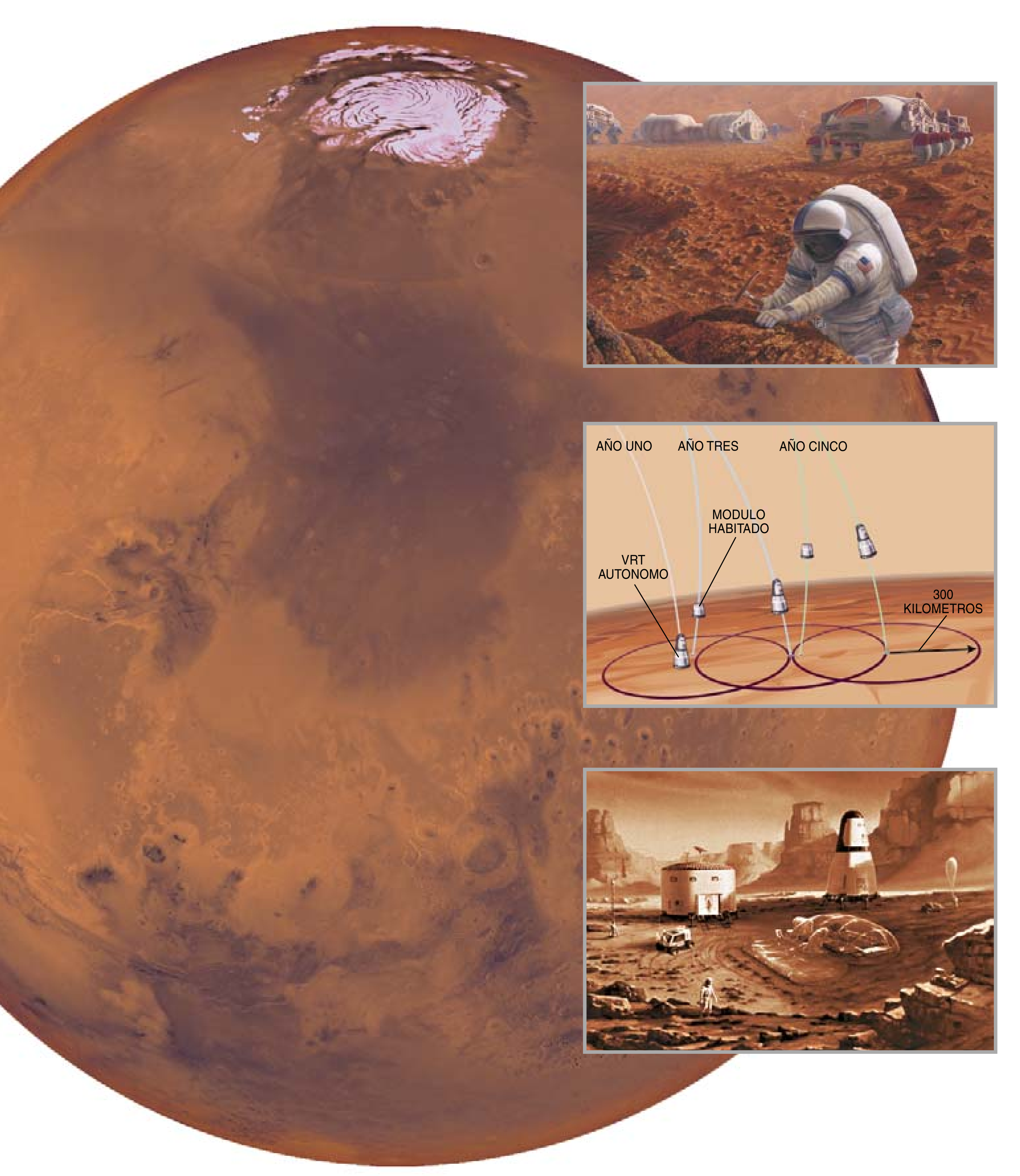
Al llegar a Marte, ocho meses después del despegue, el VRT aerofrena ayudado por la fricción entre su escudo térmico y la atmósfera del planeta. El vehículo aminora su marcha orbitando alrededor de Marte y luego aterriza en la superficie prendido de un paracaídas y con el uso de retrocohetes. La nave ha pisado el suelo. Desde la Tierra, los responsables del control de la misión sacan telerrobóticamente el vehículo grande del VRT y lo aparcan unos cientos de metros más allá. El control de la misión conecta entonces el reactor nuclear, que proveerá de energía a los compresores y las unidades de procesamiento químico.

Dentro de estas unidades, el hidrógeno traído de la Tierra reacciona con la atmósfera marciana —compuesta en un 95 por ciento de dióxido de carbono (CO_2)— para producir agua y metano (CH_4). Este proceso de metanación elimina la obligación de almacenar, largo tiempo, combustible de hidrógeno líquido criogénico, una tarea difícil. El metano se licúa y almacena; las moléculas de agua se electrolizan (se escinden en hidrógeno y oxígeno). El oxígeno se reserva para su uso posterior; el hidrógeno se recicla en la unidad de procesamiento químico para generar más agua y metano.

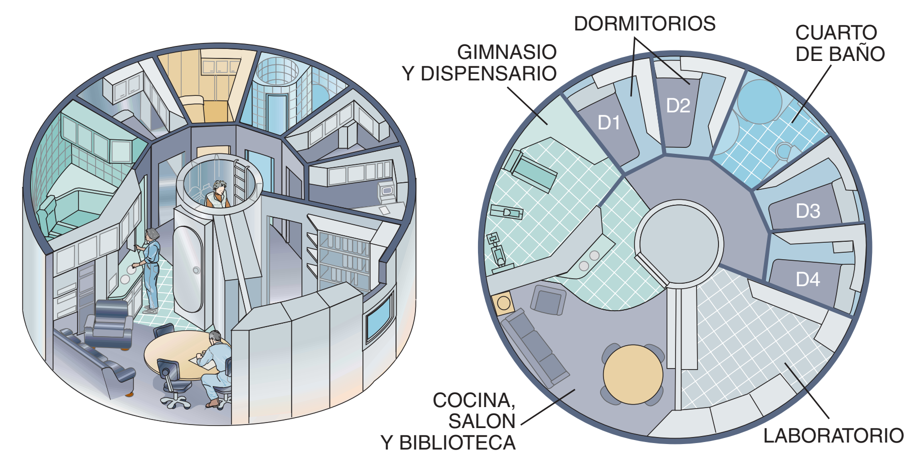
A la postre, estas dos reacciones (metanación y electrólisis) suministrarán 48 toneladas de oxígeno y 24 toneladas de metano, que acabarán empleándose en la combustión del cohete que propulsará a los astronautas en su viaje de regreso. Para asegurar que la mezcla de metano y oxígeno se queme adecuadamente, deben generarse 36 toneladas adicionales de oxígeno descomponiendo el CO_2 en la atmósfera marciana. En el proceso completo se tarda 10 meses; al final se habrán generado un total de 108 toneladas de combustible propulsor metano-oxígeno, una cantidad de propulsor para el viaje de regreso 18 veces mayor que los reactivos necesarios para producirla.

El viaje de vuelta requerirá 96 toneladas de combustible. Sobran 12 para hacer funcionar los vehículos de exploración. También se puede producir oxígeno de reserva, para respirar y para convertirlo en agua combinando el oxígeno con el hidrógeno traído de la Tierra. La capacidad de producir oxígeno y agua en Marte reduce en gran medida la cantidad de suministros vitales que deben acarrearse desde la Tierra.

Una vez este apeadero inaugural en Marte opere satisfactoriamente, despegarán de Cabo Cañaveral en 2007 otros dos cohetes, que de nuevo lanzarán su cargamento hacia Marte. Uno de ellos es un VRT autónomo exactamente igual al lanzado en 2005. Pero el otro es ahora una



1. LA MISION tripulada a Marte permitirá buscar señales de vida (*recuadro superior*). De seguirse el plan A Marte sin Escalas, un Vehículo de Retorno a la Tierra (VRT) autónomo (no tripulado) aterrizaría primero en el planeta y establecería la base con los pertrechos necesarios para la llegada de los astronautas dos años más tarde (*centro*). Cada dos años podría enviarse una misión, que dejarían tras de sí una serie de bases similares a la ilustrada aquí (*recuadro inferior*).



2. LA CASA ESPACIAL en el espacio podría parecerse a la esquematizada. El piso superior del módulo habitable tendría dormitorios para cuatro personas, así como un laboratorio, biblioteca, cocina y gimnasio. En el centro se hallaría el refugio para protegerse de las tormentas provocadas por las erupciones solares. El piso inferior (*no se muestra aquí*) serviría de garaje, taller y trastero. Durante el viaje a Marte, un sistema de amarre podría producir gravedad artificial.

nave tripulada por cuatro astronautas con provisiones para tres años. La nave porta, además, un vehículo de exploración de superficie presurizado, impulsado por oxígeno y metano, que permitirá a los astronautas acometer exploraciones de larga distancia en atuendo normal.

Llegada de los astronautas

Durante la travesía, se puede producir gravedad artificial de la misma intensidad que la de Marte, tendiendo primero un cabo entre el módulo habitado y la última fase del cohete propulsor, ya consumida; luego, el conjunto se deja girar, pongamos que a una revolución por minuto. Un sistema así eliminaría cualquier inquietud sobre los efectos negativos que la ingravidez pudiera provocar en la salud de los astronautas. La exposición a la radiación de la tripulación también será soportable. Un escudo protector de 12 centímetros de agua o provisiones puede guarecer de la radiación de las erupciones solares, constituida por protones con energías del orden de un millón de electronvolt, y habrá suficientes materiales a bordo para construir despensas adecuadas que protejan de las tormentas en tales circunstancias. La dosis residual de rayos cósmicos, unos 50 rem en toda la misión, que durará dos años y medio, representa un riesgo estadístico de cáncer del 1 por ciento, más o menos el mismo que se corre por fumar a lo largo del mismo intervalo temporal.

Llegado a Marte, el aparato tripulado larga el cabo que le unía al cohete, aerofrena y aterriza en el lugar del año 2005. Balizas colocadas en el emplazamiento original permitirán que la nave tome tierra en el lugar exacto, pero si el aterrizaje se desvía en decenas o incluso centenares de kilómetros, los astronautas podrán, pese a ello, alcanzar el lugar correcto al volante de su vehículo. Y en el caso improbable de que la nave se pose a miles de kilómetros, el segundo VRT que se lanzó con la nave tripulada servirá de sistema de seguridad. Si también éste fallara, las raciones suplementarias de la nave tripulada asegurarán la supervivencia de la tripulación hasta la arribada de un tercer VRT con suministros adicionales en 2009.

Con la técnica actual, las probabilidades de un aterrizaje fallido son pequeñas. Dando por descontado que los astronautas alcancen la ubicación 2005 conforme a lo previsto, el segundo VRT aterriza a escasos centenares de kilómetros. Este nuevo VRT, lo mismo que sus predecesores, comienza a fabricar combustible, esta vez para la misión del 2009, que a su vez volará con un VRT adicional para inaugurar un tercer emplazamiento en Marte.

Así, con el plan A Marte sin Escalas, los Estados Unidos y sus socios lanzarían dos cohetes de carga cada dos años: uno para enviar un equipo de cuatro personas que habiten en Marte y el otro con el encargo de preparar un nuevo emplazamiento para la siguiente misión. La tasa media de un lanzamiento por año es sólo un 15 % de la tasa a la que Estados Unidos lanza el transbordador espacial. Al vivir de lo que dé el entorno, estrategia empleada en el plan A Marte sin Escalas, se viene abajo el mito de un vuelo tripulado a Marte en una meganave espacial fantástica y resitúa la empresa en un nivel de dificultad similar al de las misiones *Apolo*.

Los astronautas permanecerán en la superficie del planeta año y medio. Aprovechando los vehículos de superficie para llevar a cabo exploraciones exhaustivas del terreno. Con unas reservas de 12 toneladas de combustible para las camionetas, los astronautas pueden recorrer más de 24.000 kilómetros durante su estancia, lo que les proporcionará el género de movilidad necesaria para llevar a cabo una búsqueda minuciosa de signos de vida pasada o presente, investigación decisiva para aclarar si la vida es un fenómeno exclusivo de la Tierra o si es proceso común en el universo.

Nadie se quedará en órbita. La tripulación se beneficiará, pues, de la gravedad natural y de la protección contra la radiación que ofrece el ambiente marciano. En consecuencia, no se requiere un retorno rápido a la Tierra, una complicación que ha empantanado los proyectos de una misión constituida por una nave nodriza en órbita más otras naves pequeñas enviadas a la superficie. Cuando concluya su estancia, los astronautas

Requerimientos a satisfacer en una misión a Marte sin Escalas con cuatro tripulantes

	Necesidades diarias por persona (kilogramos)	Porcentaje reciclado	Masa total para un viaje de ida de 200 días (kilogramos)	Total para 600 días de estancia en la superficie (kilogramos)
Oxígeno	1,0	80	160	0
Alimentos deshidratados	0,5	0	400	1200
Alimentos enteros	1,0	0	800	2400
Agua potable	4,0	80	0	0
Agua para limpieza	26,0	90	2080	0
Total	**32,5**	**87**	**3440**	**3600**

Cupos de masa para la misión A Marte sin Escalas

Componente del VRT	Toneladas	Componente del módulo habitáculo	Toneladas
Estructura de la cabina del VRT	3,0	Estructura del habitáculo	5,0
Sistema de mantenimiento vital	1,0	Sistema de mantenimiento vital	3,0
Intendencia y requerimientos	3,4	Intendencia y requerimientos	7,0
Matriz solar (5 kilowatt de electricidad)	1,0	Matriz solar (5 kilowatt de electricidad)	1,0
Sistema de control de reacción	0,5	Sistema de control de reacción	0,5
Gestión de información y comunicaciones	0,1	Gestión de información y comunicaciones	0,2
Mobiliario e interiores	0,5	Mobiliario e interiores	1,0
Trajes espaciales (4)	0,4	Trajes espaciales (4)	0,4
Repuestos y margen (16%)	1,6	Repuestos y margen (16%)	3,5
Aeroescudo	1,8	Vehículo de exploración presurizado	1,4
Vehículo explorador	0,5	Vehículos de exploración abiertos (2)	0,8
Suministro de hidrógeno	6,3	Utillaje de laboratorio	0,5
Fases de propulsión del VRT	4,5	Utillaje científico de campo	0,5
Planta de producción de combustible	0,5	Tripulación	0,4
Reactor nuclear (100 kilowatt de electricidad)	3,5		
Masa total del VRT	28,6	Masa total del habitáculo	25,2

3. EL VEHICULO DE RETORNO a la Tierra despega de la superficie de Marte con cuatro tripulantes (*derecha*). Se detallan en la tabla las cargas del VRT y del módulo habitáculo.

de Marte volverán en vuelo directo con su VRT. Conforme progresen las misiones, quedarán en el planeta una cadena de pequeñas bases, que abrirán amplios espacios de Marte a una exploración humana continuada y, a la larga, a la colonización.

En 1990, cuando David A. Baker y yo propusimos por primera vez las bases del plan A Marte sin Escalas, la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio lo juzgaba demasiado radical y no le prestó atención suficiente. De entonces acá, y contando con el apoyo de Michael Griffin, antiguo gerente de la NASA para la exploración, así como del actual director del ente, Daniel S. Goldin, el grupo encargado de las misiones tripuladas a Marte en el Centro Espacial Johnson decidió considerar de nuevo nuestra idea.

La Sociedad de Marte

En 1994 los investigadores allí adscritos elaboraron una estimación del coste de un programa basado en una versión ampliada del plan A Marte sin Escalas que había sido agrandada más o menos al doble. Su resultado: cincuenta mil millones de dólares. Es de destacar que en 1989 el mismo grupo le había asignado un precio de unos cuatrocientos mil millones de dólares al tradicional y embarazoso enfoque de misión tripulada tradicional, basada en el ensamblamiento en órbita de una meganave espacial. Yo creo que con unos cuantos ajustes más en el diseño de la misión, el coste podría limitarse al ámbito de los 20.000 o 30.000 millones de dólares. Invertida a lo largo de 10 años, esta suma constituiría un montante anual de aproximadamente un 20 por ciento del presupuesto de la NASA, o cerca de un 1 por ciento de la partida militar de la nación. Es un precio pequeño por un nuevo mundo.

Con el fin de recabar el apoyo del público para un proyecto de misión a Marte más amplio, que incluya la exploración con robots además de la humana, y para iniciar misiones con financiación privada, se formó en 1998 la Sociedad de Marte. Como primer proyecto privado, la sociedad construye una base de simulación de Marte en el cráter Haughton, formado por el impacto de un meteorito en la isla de Devon, en el Artico canadiense. Debido a sus similitudes geológicas y climáticas con el planeta rojo, la NASA se ha venido interesando por esta zona de un tiempo a esta parte. La Estación de Investigación de Marte en el Artico (MARS, de las siglas en inglés) de la Sociedad de Marte emprenderá un estudio exhaustivo del entorno y proveerá de un lugar donde poner a prueba las tácticas de exploración humana y los prototipos de equipamiento, entre ellos los habitáculos, los sistemas de movilidad en tierra, los sistemas fotovoltaicos y los útiles especializados de perforación. El plan actual se concentra en la puesta a punto de la base MARS en la isla de Devon. Debería bastar con un presupuesto de un millón de dólares aproximadamente.

Con la credibilidad ganada en semejante proyecto, la sociedad acrecentará, eso esperamos, sus recursos financieros. Podría entonces ayudar a subvencionar misiones robóticas a Marte y, llegado el caso, expediciones humanas, quizá compartiendo el coste con la NASA u otros organismos gubernamentales. Pero lo que está claro es que la manera más rápida para enviar gente a Marte es enseñarle al gobierno por qué debe invertir en este empeño. La Sociedad, en consecuencia, ha lanzado una campaña informativa dirigida a los círculos de poder.

Algún día, millones de personas vivirán en Marte. ¿Qué lengua hablarán? ¿Qué valores y tradiciones conservarán como bien preciado cuando se trasladen desde allí al sistema solar y allende sus confines? Cuando miren al pasado, a nuestros días, ¿revestirá alguna otra de nuestras acciones la importancia que entraña el poner los fundamentos de su sociedad?

ROBERT ZUBRIN *preside la Sociedad de Marte y es fundador de Astronautas Pioneros, que realizan investigación y desarrollo en la exploración espacial.*

2 A MARTE PASANDO POR SUS LUNAS

Fobos y Deimos serían ideales plataformas para saltar a Marte

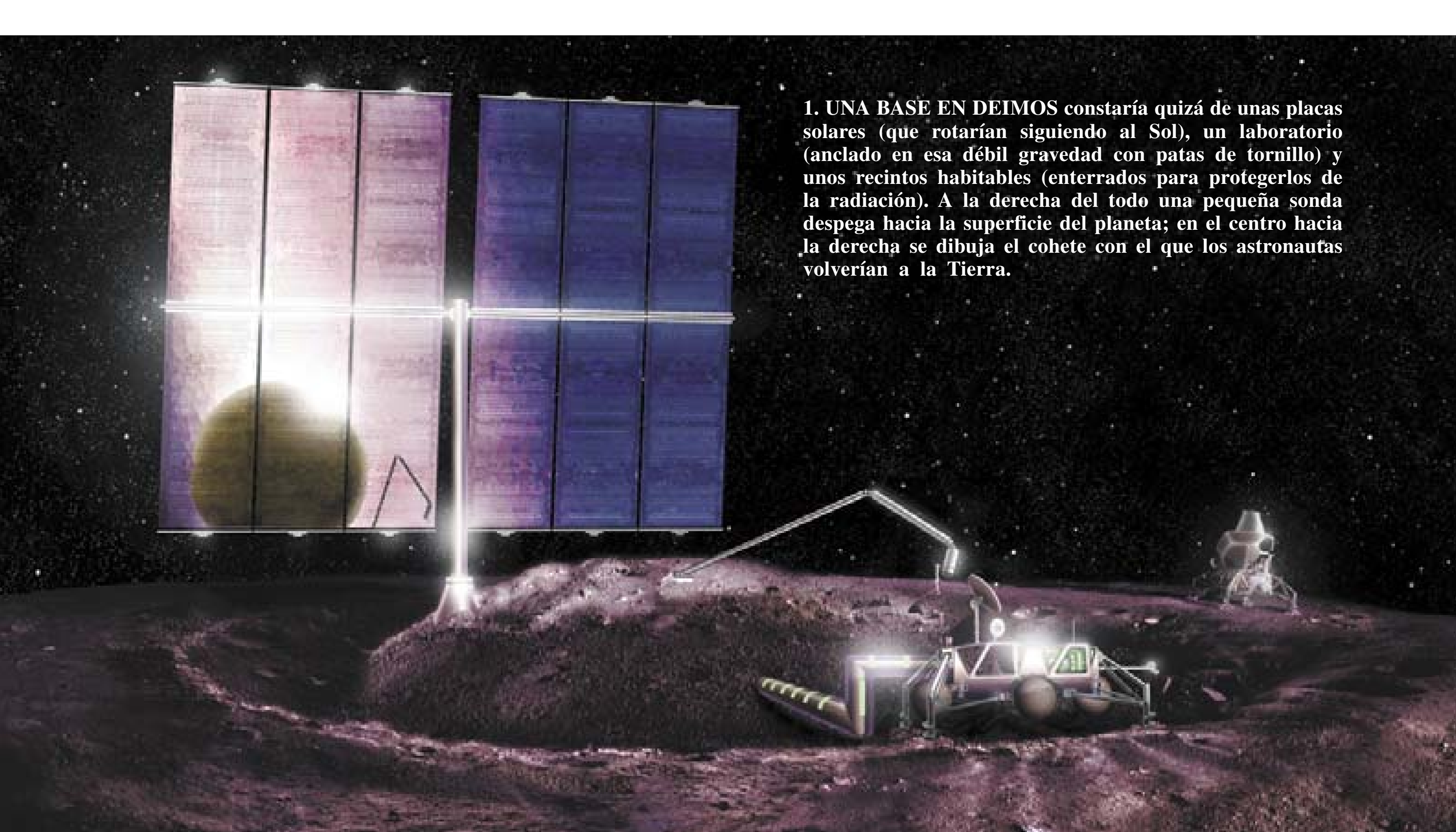
S. Fred Singer

Treinta años después del primer alunizaje de un *Apolo* el debate entre quienes se inclinan por las misiones autónomas y los que defienden las tripuladas no ha cambiado gran cosa. Pero muchos de los que trabajamos con robots hemos ido abandonando nuestra oposición a las misiones tripuladas para adoptar tesis más moderadas. En situaciones especiales enviar personas al espacio no es sólo un caro alarde, sino que puede resultar más rentable que mandar un robot. La exploración de Marte es uno de esos casos.

La ventaja de los astronautas estribaría en que explorarían Marte sobre la marcha, sin tener que esperar a recibir comunicaciones con retraso. Cuando hiciesen un hallazgo interesante ahondarían en él con nuevos experimentos. Los robots no pueden apañárselas si unos seres humanos no tiran de sus hilos. Pero, ¿dónde estarían los astronautas? La respuesta inmediata —en la superficie de Marte— no es necesariamente la más conveniente. Las lunas marcianas, Fobos y Deimos, valdrían como cabezas de puente no demasiado costosas.

La mayoría de los proyectos de expediciones marcianas prevén un par de naves espaciales. La primera llevaría los propergoles y otros componentes pesados, los módulos de reserva y los vehículos de reentrada a Marte o a sus proximidades. Como la duración de ese viaje no es una cuestión crucial, los gastos podrían reducirse con propulsiones eléctricas y trayectorias que sacasen partido de la gravedad. Harina de otro costal es la segunda nave, que transportaría a los astronautas. Tendría que atravesar los cinturones de radiación terrestres deprisa; para ahorrar pertrechos, el tiempo de tránsito hasta Marte habría de ser lo más breve posible. A corto plazo, los cohetes químicos parecen la única opción viable.

Los distintos proyectos divergen en cuanto a qué pasaría una vez la nave de la tripulación y la de carga, ya en el planeta rojo, estuviesen acopladas. En orden creciente de dificultad y costes, hay seis posibilidades: un vuelo de aproximación a Marte parecido a las primeras misiones Apolo, con vuelta inmediata a la Tierra; una nave en órbita alrededor de Marte que permitiese una estancia más larga en las cercanías del planeta; una misión Fobos-Deimos (F-D), con transferencia a una órbita ecuatorial circular y aterrizaje en



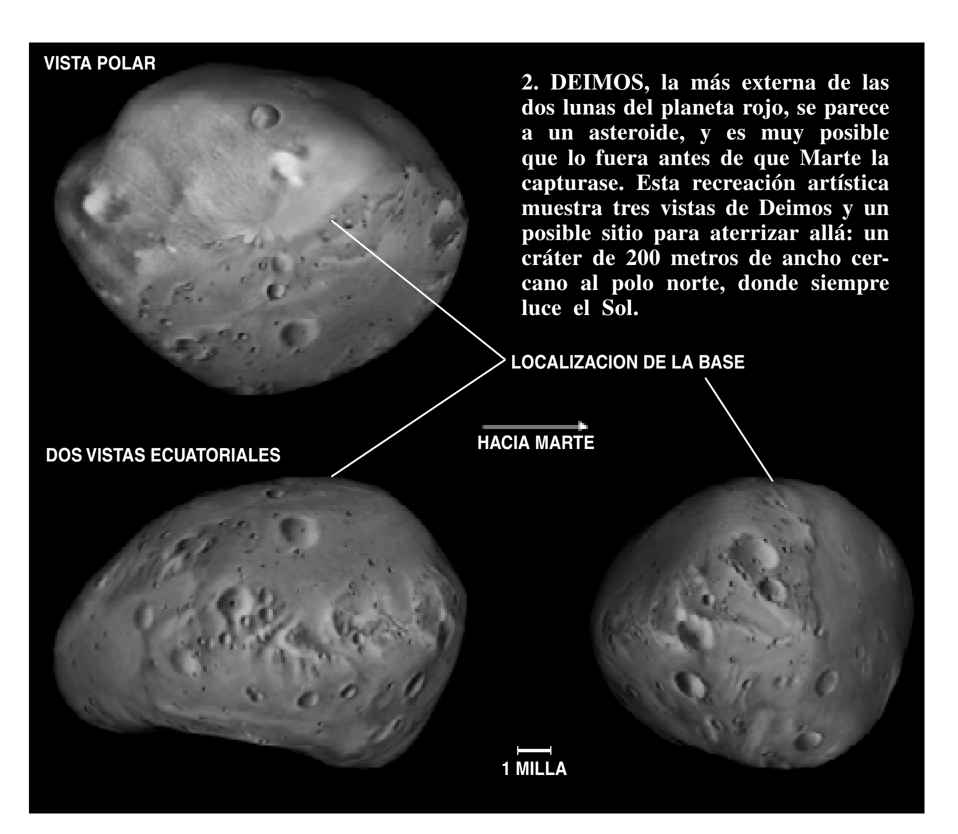
1. UNA BASE EN DEIMOS constaría quizá de unas placas solares (que rotarían siguiendo al Sol), un laboratorio (anclado en esa débil gravedad con patas de tornillo) y unos recintos habitables (enterrados para protegerlos de la radiación). A la derecha del todo una pequeña sonda despega hacia la superficie del planeta; en el centro hacia la derecha se dibuja el cohete con el que los astronautas volverían a la Tierra.

una luna marciana, preferentemente Deimos, donde se establecería una base; una misión híbrida (F-D-plus), que añadiría una breve incursión en la superficie marciana; un aterrizaje a gran escala en Marte, con una larga permanencia y un programa de investigación completo; finalmente, una estancia prolongada en Marte, donde los astronautas levantarían estructuras permanentes e iniciarían la habitación continua del planeta.

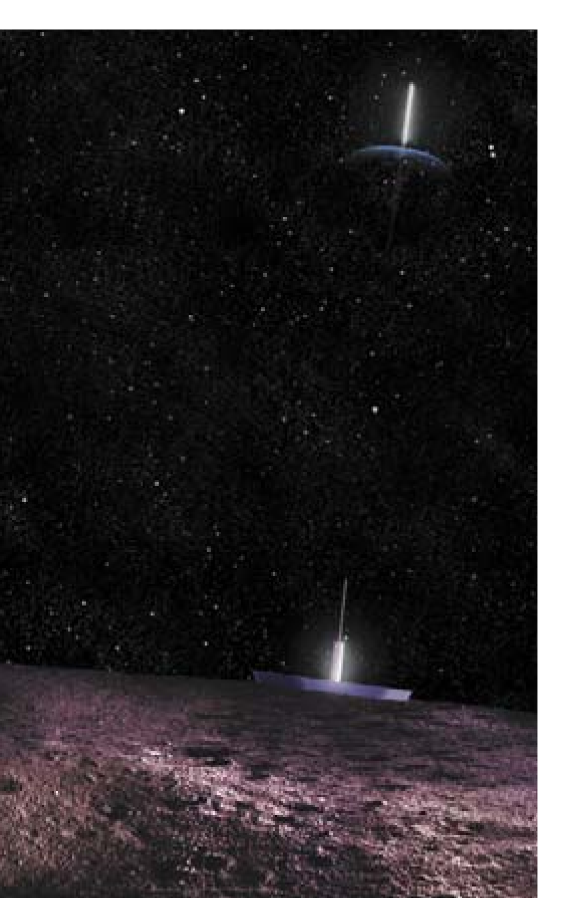
La primera misión tripulada ha de ser ambiciosa, pero no demasiado. Las misiones F-D y F-D-plus ofrecen un atractivo equilibrio entre costes y beneficios y proporcionarían a la ciencia los mayores beneficios.

Deimos sería una excelente base para el estudio de Marte. Desde allí, los astronautas podrían enviar y controlar sondas atmosféricas, penetradores subsuperficiales y vehículos orugas por todo Marte. La órbita cuasisincrónica de la luna permite el contacto directo con una oruga durante unas 40 horas seguidas. Fobos, más cercano al planeta, describe más deprisa su órbita y, por tanto, no tiene esa ventaja. Pero en una u otra luna los astronautas podrían analizar las muestras que trajesen las sondas sin miedo a contaminar la Tierra con alguna forma de vida marciana.

Al tener a mano el vacío sería más fácil manejar ciertos instrumentos de laboratorio, como los espectrómetros de masas y los microscopios electrónicos. Trasladando la nave a distintos lugares sobre Deimos —sería fácil con una gravedad tan pequeña— los astronautas se protegerían de las tormentas solares y de las lluvias de meteoritos. Además, las lunas son en sí mismas apasionantes; con la toma directa de muestras se investigaría su origen.



2. DEIMOS, la más externa de las dos lunas del planeta rojo, se parece a un asteroide, y es muy posible que lo fuera antes de que Marte la capturase. Esta recreación artística muestra tres vistas de Deimos y un posible sitio para aterrizar allá: un cráter de 200 metros de ancho cercano al polo norte, donde siempre luce el Sol.



En comparación, una base operativa en Marte tendría muchos inconvenientes. Habría que seguir guiando por control remoto las orugas repartidas por otras partes del planeta, y para ello se necesitaría un sistema de satélites de comunicaciones que retransmitiera las órdenes. Sería más difícil llevar a la base las muestras extraídas en lugares remotos. Harían falta pesadas baterías de reserva o generadores nucleares que diesen energía a la base de noche o en una tormenta de polvo.

Una incursión desde las lunas encerraría la mayoría de las ventajas de una misión que aterrizase en Marte. No haría falta que se posase en Marte un vehículo con todas las de la ley; bastaría con un pequeño transbordador, y así se reduciría el coste total de la misión. Saliendo de una base establecida en órbita, los astronautas tendrían más flexibilidad a la hora de seleccionar un sitio para aterrizar; la tripulación de un gran vehículo de aterrizaje, en cambio, tendría que ir sobre seguro y escoger un sitio desde donde el despegue del viaje de vuelta a la Tierra fuese fácil.

En un futuro más lejano las lunas podrían valer como estaciones de paso para el descenso o el ascenso desde la superficie por medio de cables espaciales. Desde Deimos podrían dirigirse a salvo grandes experimentos climatológicos, la alteración de las pautas del clima, por ejemplo, o la fusión de los casquetes polares, y se pondrían así a prueba técnicas que transformarían a Marte en otra Tierra o mitigarían el cambio climático en ésta.

Aunque en una fase inicial es difícil analizar los costes y beneficios de cada tipo de misión, hice en un congreso una encuesta entre los expertos en la exploración de Marte. Como primera misión, la F-D-plus fue la clara ganadora, la que arrojaba los mayores beneficios netos. Abarca todas las posibilidades científicas más económica y rápidamente, y pondría los fundamentos de una base y una colonia futuras en la superficie.

S. FRED SINGER *enseña en la Universidad George Mason. Pionero del uso de cohetes para la investigación de la alta atmósfera y del espacio próximo a la Tierra, fue el primer director del Centro Meteorológico Nacional por Satélite. Concibió la datación de los meteoritos por medio de los rayos cósmicos.*

3 AUTOBÚS INTERPLANETARIO

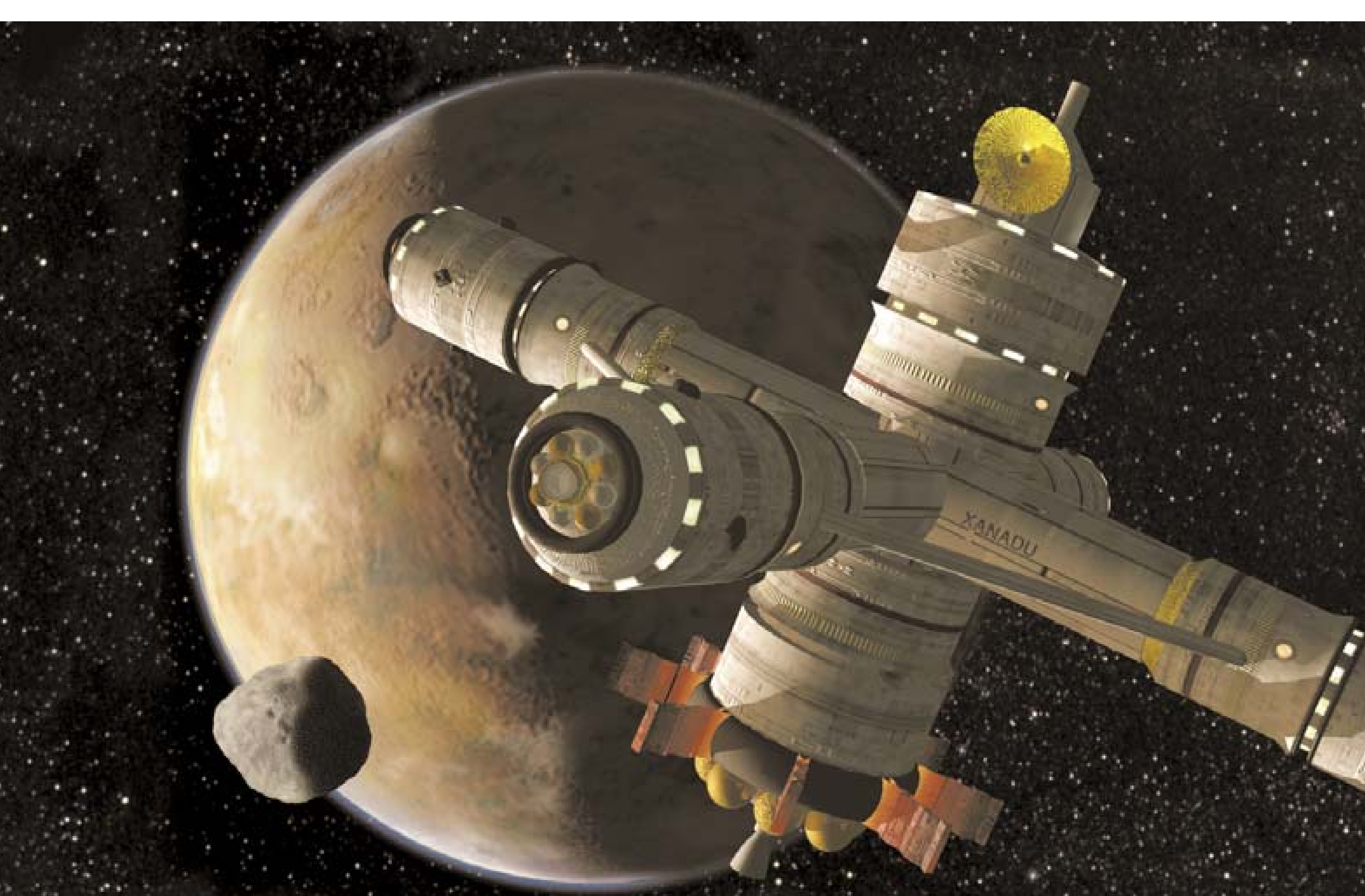
Las trayectorias con asistencia gravitatoria entre la Tierra y Marte reducirían los costes del transporte de tripulación y equipos

James Oberg y Buzz Aldrin

Los cohetes químicos han sido muy útiles para guiar los primeros pasos de la humanidad por el espacio. Uno de los autores (Aldrin) se ha montado en ellos para ir a la Luna y regresar a la Tierra. Puede certificar, pues, su calidad técnica. Sin embargo, este tipo de propulsores deja mucho que desear para viajes que van mucho más allá de nuestro satélite.

Incluso Marte, lógicamente el siguiente destino espacial, supondría una dura prueba para los cohetes químicos. Llevar una tripulación a ese planeta exigiría tal cantidad de combustible, que en casi todas las hipótesis barajadas se contempla su producción en cuantía ingente, en la superficie del planeta, para el viaje de regreso. Esto añadiría otro factor de riesgo y complejidad a la misión propuesta. Por otra parte, quizá hasta dentro de diez años no puedan utilizarse cohetes de plasma, más potentes, en naves tripuladas.

Creemos que existe una solución intermedia: utilizar los cohetes químicos aumentando su modesta potencia propulsora mediante un ingenioso aprovechamiento de las fuerzas gravitatorias en las maniobras. En este tipo de expediciones, se pretende que el vehículo espacial se precipite hacia un cuerpo celeste, especialmente un planeta, pasando tan cerca del mismo que su campo gravitatorio modifique la velocidad del vehículo. Este procedimiento se utiliza corrientemente para acelerar las sondas destinadas a los planetas más lejanos del sistema solar, que de otro modo serían inalcanzables. Los controladores de misiones comenzaron a hacer uso de asistencia gravitatoria en los años setenta. Así, en la *Mariner 10* a Mercurio, que recibió la impulsión del campo gravitatorio de Venus; en la *Pioneer 11* a Saturno, que sobrevoló Júpiter, y la *Voyager 1*, catapultada por el portentoso campo gravitatorio de Júpiter al espacio interestelar, que ahora atraviesa a 62.000 kilómetros por hora. Aun cuando no existan cuerpos celestes de masa apreciable entre la Tierra y Marte, todavía es posible realizar una misión entre los dos planetas que aproveche su fuerza gravitatoria.



La metáfora de la pelota

Una maniobra con asistencia gravitatoria semeja el rebote de una pelota contra una pared. En esta imagen, la nave espacial viene a ser la pelota, y el planeta la pared. Al chocar la pelota contra la pared, la velocidad con que sale rebotada será mayor o menor según se acerque la pared a la pelota o se aleje de ella en el momento del contacto de ambas. La relación matemática está descrita por un principio fundamental de la física newtoniana: la conservación de la cantidad de movimiento (masa × velocidad). El cambio que experimenta la cantidad de movimiento de la pelota está compensado por una variación en sentido inverso de la cantidad de movimiento de la pared.

En una maniobra de este tipo, el vehículo espacial "colisiona" elásticamente con el campo gravitatorio del planeta. Si el planeta se mueve hacia el arco de trayectoria que describe la nave en su aproximación, ésta saldrá "rebotada" a una velocidad mayor que la que llevaba antes de colisionar. Como en el ejemplo de la pelota, aquí también se conserva la cantidad de movimiento, magnitud que en el planeta varía igual que en la nave espacial; pero la inmensa desproporción que hay entre las masas que chocan hace inapreciable el cambio de velocidad del planeta.

1. UN CASTILLO EN ORBITA alrededor de Marte podría disponer de cuatro puertos de embarque, en los extremos de los brazos en cruz, para recibir robots de aprovisionamiento y "taxis" con destino al planeta. Los alimentos y demás provisiones se almacenarían en los brazos, uno de los cuales podría alojar un invernadero con luz artificial. En el eje central, los camarotes estarían protegidos con un fuerte blindaje contra las tormentas solares. Si se utilizara propulsión nuclear, la nave dispondría también de radiadores para disipar el calor (*abajo*).

Cuanto mayor sea la masa del planeta, más acentuada será la desviación impresa a la trayectoria del vehículo espacial. Júpiter, con mucho el planeta mayor de nuestro sistema solar, puede cambiar en 160 grados la dirección un vehículo con relación al planeta. Los controladores de la misión pueden modificar la velocidad y la dirección de una nave dentro del plano orbital; también pueden situar esa nave en un nuevo plano orbital, enteramente distinto del que ocupa la órbita del planeta en torno al Sol.

¿Cómo aprovechar la asistencia gravitatoria para llevar gente a Marte? La respuesta es que la gravedad permitiría realizar ajustes críticos en las trayectorias de vehículos espaciales "orbitadores" (*cycler*); éstos aprovecharían la gravedad de la Tierra y de Marte para dar forma primaria a las trayectorias que recorren una y otra vez entre ambos planetas, como los autobuses de línea, transbordando personas y suministros. Habitualmente el orbitador no tendrá que desacelerarse para entrar en órbita marciana, ni tampoco que despegar desde la superficie del planeta para el regreso a la Tierra. La idea básica surgió hace más de treinta años, pero continúa originando novedosas estrategias, dignas de mayor atención que la que acostumbran recibir en los debates sobre expediciones a Marte.

Fiar en la gravedad como soporte del vehículo orbitador encierra su atractivo. Reduciría al mínimo la necesidad de maniobras de propulsión. Estas maniobras consumirían enormes cantidades de combustible, considerada la complejidad del equipo de intendencia que requiere un viaje interplanetario.

Castillos en el cielo

El concepto de orbitador se remonta a los primeros años ochenta. Alan L. Friedlander y John C. Niehoff describieron un sistema en el cual varios habitáculos espaciales de larga ocupación (a los que llamaron castillos) se colocarían en órbitas solares que se aproximarían periódicamente a la Tierra y a Marte. Durante el crucero interplanetario, de dos o más años, los astronautas ocuparían estos castillos. Después, al acercarse a Marte o la Tierra, los viajeros se valdrían de vehículos más austeros ("taxis") para ir y volver del castillo al planeta. Para repostar los castillos, se utilizarían técnicas como la propulsión iónica, de alta eficacia aunque demasiado lentas para los pasajeros humanos. El viaje en taxi entre el castillo y el planeta duraría una semana o menos.

Según la idea original, los castillos describirían órbitas en torno al Sol que encontrarían la Tierra cada cinco años y Marte cada 3,75 años, aproximadamente. En una segunda propuesta, los habitáculos pasarían por la Tierra cada tres años y, por Marte, cada 7,5 años. Ninguna de estas órbitas iba a sufrir modificación apreciable por el cruce con los planetas. Por tanto, la asistencia gravitatoria no desempeñaba papel alguno en estas primeras hipótesis.

En 1985 Aldrin propuso un orbitador habitable que utilizaría de manera esencial la ayuda de la gravedad cada vez que pasara cerca de la Tierra. Estos castillos también rodearían el Sol, pero la estrategia adoptada abreviaría el tiempo de tránsito interplanetario siguiendo órbitas cuyo punto más distante del Sol (el afelio) estaría allende Marte. La principal ventaja sería que los habitáculos pasarían por cada planeta a intervalos de 2,7 años, y que el tiempo de tránsito de un planeta a otro se reduciría a seis meses. Aunque se necesitarían periódicamente maniobras de propulsión para mantener el habitáculo en esa ventajosa órbita, no serían críticas en el tiempo, y podrían desempeñarlas sistemas propulsores de alta eficacia y escasa impulsión.

Además, una de las maniobras más delicadas se realizaría en gran parte por asistencia gravitatoria. El intervalo transcurrido entre los encuentros del habitáculo con Marte no sería un múltiplo entero, exacto, del año marciano. El planeta se caería, pues, en un lugar diferente del sistema solar cada vez que el habitáculo se le aproximara. Habría que ajustar cada nueva órbita del habitáculo, de manera que encontrase al planeta. En términos técnicos, los controladores de la misión tendrían que hacer girar la línea de ápsides de la órbita del habitáculo (línea que une el perihelio —punto más cercano al Sol— con el afelio) hasta que la trayectoria coincida con la posición de Marte en el próximo encuentro previsto. Aldrin intuyó que esta desviación podría principalmente lograrse por asistencia gravitatoria cuando el habitáculo pasara rozando la Tierra.

A causa de su elongada órbita, el habitáculo sobrevolaría la Tierra y, sobre todo, Marte a velocidades



2. LA TRAYECTORIA ORBITADORA conduciría el habitáculo desde Marte hasta la Tierra (*en amarillo, arriba*), Después, en órbita solar, la nave encontraría periódicamente a la Tierra (*verde y azul, arriba y centro*); aprovecharía aquí la gravedad terrestre para torcer su trayectoria. Tras el retorno a Marte, se quedaría en una órbita elongada de "aparcamiento" (*abajo*).

elevadas. Semejante celeridad podría crear problemas si hubiera que frenar el habitáculo para entrar en el planeta. Deceleración que nunca sería precisa, pues los pasajeros utilizarían taxis para desplazarse a los planetas.

Pese a todas estas ventajas, es difícil comparar los costes de la solución expuesta con otros planteamientos más tradicionales de abordar la exploración marciana. Por supuesto, habrá que construir y poner en órbita una importante infraestructura para que el orbitador realice su misión. Mas, una vez en órbita, esa infraestructura podría servir para enviar docenas, por no decir centenares, de personas a Marte. El cálculo de cuántos pasajeros se necesitarán para recuperar costes sería, empero, sumamente difícil por la inseguridad en cuanto al número de habitáculos requeridos, los costes de construirlos, lanzarlos, repostarlos y mantenerlos, y el coste de realizar misiones con cohetes monoetapa.

Progresos en orbitadores

Aldrin no ha dejado de depurar sus ideas sobre los habitáculos orbitadores y la exploración de Marte. Piensa en habitáculos que sigan trayectorias que encuentren los planetas a velocidades menores, concediendo así más tiempo y mayor flexibilidad a los viajes entre el castillo y los planetas. En lugar de una simple secuencia de encuentros Tierra-Marte-Tierra-Marte, aquí se aprovecharía de modo creativo la mecánica celeste para añadir "tiempo de residencia", lo mismo en Marte que en la Tierra.

Según este plan, el paso único por la Tierra se convertiría en una secuencia múltiple de encuentros Marte-Tierra-Tierra-Tierra-Tierra-Marte (*véase la figura 2*). Durante la porción de trayectoria cercana a la Tierra, el habitáculo se mantendría en una órbita alrededor del Sol, semejante a la de la Tierra, pero cada seis meses sobrevolaría la Tierra y utilizaría el campo gravitatorio de este planeta para ajustar la órbita con miras al siguiente encuentro. Asimismo, el paso por Marte tendría un período de vacilación durante el cual el castillo esperaría a que la Tierra se colocase en la posición adecuada para el trayecto de regreso. La trayectoria se itera una vez cada 52 meses; en ese intervalo, la Tierra y Marte entran dos veces en conjunción entre sí (dos períodos sinódicos).

En la ejecución de tales maniobras bianuales de sobrevuelo orbital de la Tierra, los controladores se valdrían de la gravedad terrestre para cambiar el plano de la órbita de la nave espacial alrededor del Sol por otro inclinado en más de 10 grados con respecto a la órbita de la Tierra, pero con el mismo período orbital que ésta (un año). Este sistema orbitador se sirve de tres maniobras bilaterales como la descrita (o un encuentro de seis meses que antecede o sigue a un reencuentro de 12 meses), y a continuación una aceleración por gravedad hacia el trayecto que conduce a Marte. La NASA tiene ahora en sus planes utilizar la trayectoria de reencuentro Tierra-Tierra de seis meses para la misión de recogida de muestras marcianas (*Mars Sample Return*) y para la misión científica *CONTOUR Discovery*.

Introducir un tiempo de residencia en Marte plantea numerosos retos. La masa del planeta no basta para provocar siquiera una desviación de 10 grados en la trayectoria de una nave espacial a las velocidades de aproximación típicas de los orbitadores. Por ello los controladores tendrían que valerse de la gravedad marciana, asistida por una pequeña maniobra de propulsión para girar la nave hacia el interior del sistema solar. El vehículo encontraría entonces a Venus y sacaría partido de su tirón gravitatorio, semejante al de la Tierra, para modificar su dirección hacia un nuevo encuentro con Marte.

Dennis V. Byrnes ha sometido a examen opciones similares. Byrnes, comprobó la viabilidad de un sistema orbitador basado en tres habitáculos cuya trayectoria abarcase tres períodos sinódicos (unos 78 meses) con cinco sobrevuelos de la Tierra, separados por intervalos de un año, entre los encuentros con Marte. Este sistema brindaría la oportunidad de viajar de la Tierra a Marte, o viceversa, cada 26 meses.

Análisis como el de Byrnes ponen de relieve que el estudio de la aptitud de los vehículos orbitadores para viajes interplanetarios tripulados no ha pasado de los aspectos más superficiales. A medida que los especialistas vayan refinando sus ideas a través de una serie de proyectos de misión en continua superación, será más factible que la humanidad llegue al planeta rojo merced a este sistema de gran flexibilidad y solidez. No solamente una vez; cuantas quiera.

JAMES OBERG *y* BUZZ ALDRIN *colaboran en planes de exploración orbital del planeta Marte desde 1981. Oberg, consultor aeroespacial, fue ingeniero del Centro Espacial Johnson de la NASA en Houston de 1975 a 1997. Aldrin, el segundo hombre que pisó la Luna, se retiró del cuerpo de astronautas de la NASA en 1970 para volver a la Fuerza Aérea de EE.UU., donde dirigió la escuela de prueba de pilotos en la Base Aérea de Edwards. Actualmente es consultor aeroespacial.*

MANTENER LA CORDURA EN EL ESPACIO

Para las misiones de años enteros no bastará tener buen temple. Se necesitará una preparación psicológica especial

Sarah Simpson

Mientras flotaba en el módulo de entrada de la estación espacial Mir, Andy Thomas comprendió que la aventura no iba a ser fácil. Para el astronauta australiano fue como arrastrarse por la oscura galería de una mina agarrando una cuerda de nudos entre bultos de equipo. El incómodo trayecto desembocó en un menguado compartimento con techo y paredes ilustradas con manchas de café, en las zonas no cubiertas por cajas metálicas, libros y tubos desordenados. Ese iba a ser el hogar de Thomas y otros dos cosmonautas durante cinco meses de 1998.

Aquella experiencia fue como una escapada de fin de semana si se la compara con una misión de ida y vuelta a Marte, en la que los astronautas se encerrarían hasta ocho meses seguidos en una cápsula y permanecerían dos años y medio aislados del resto del mundo, viendo las mismas caras día tras día, sufriendo los trastornos de la ingravidez, sin momentos de soledad. Viajar a Marte, que debería ser una de las mayores aventuras de la humanidad, podría convertirse en una frustración humillante si al planear las misiones no se idea el modo de evitar que los exploradores del espacio se vuelvan locos unos a otros.

"Una misión de 10 días en el transbordador puedes aguantarla", afirma Thomas. Pero él y otros colegas sostienen que la excitación de la novedad y la fuerza de voluntad no son suficientes en misiones más largas. Igual que los técnicos se cuidan de no exigir demasiado del equipo físico —respetando márgenes de seguridad y trabajando con sistemas redundantes—, también han de valorar la capacidad de los usuarios de manera realista. "Suponer que la gente con 'buena madera' y el entrenamiento adecuado es capaz de acometer cualquier cosa es arriesgado", advierte David F. Dinges, director de la unidad de psiquiatría de la facultad de medicina de la Universidad de Pennsylvania. "Vamos a enviar personas muy preparadas, pero no titanes."

Una ojeada al pasado nos ilustra sobre los posibles fracasos. La tensión por exceso de trabajo provocó una rebelión en la estación Skylab durante el tercero y último relevo de tripulación en noviembre de 1973. Los tres hombres se iban retrasando cada vez más sobre el plan previsto y decidieron tomarse un día de descanso, desobedeciendo a los controladores. En la estación espacial Mir también hubo situaciones delicadas. Las diferencias de idiomas y culturas acentuó las tensiones: los estadounidenses se quejaban de la arbitrariedad de los rusos, y éstos se lamentaban del afán de protagonismo de algunos de sus visitantes.

Son conductas que se repiten entre quienes han soportado encierros similares en submarinos nucleares, plataformas petrolíferas en alta mar y estaciones aisladas en la Antártida. Jack Stuster, estudioso del comportamiento adscrito a la NASA, cuenta que un mecánico de motores diesel en un pequeño puesto destacado de la Marina en la Antártida sufrió una depresión tan fuerte, que descuidó el único generador de la estación. De no haber sido por el médico que le ayudó a recuperarse, se habría producido una verdadera catástrofe.

Los conflictos personales encabezan la lista de problemas que revelan los diarios analizados por Stuster y otros expertos. Asuntos normalmente triviales, como el sentirse excluido de una pandilla o soportar los chistes de un compañero de cuarto repetidos hasta la exasperación, se hinchan y enquistan dentro de un estrecho recinto. Raras veces han llegado tales conflictos a comprometer el éxito de una misión, pero una tripulación que no esté bien acoplada durante una expedición a Marte podría provocar un desastre.

La NASA, prosiguiendo los trabajos de las agencias del espacio europea y rusa, se esfuerza en aprender cuál es la mejor manera de observar estos problemas entre los astronautas. Con soporte de la NASA, el Instituto Nacional de Investigaciones Biomédicas Espaciales proyecta invertir unos 500 millones de pesetas en investigar la



UNOS ASTRONAUTAS APIÑADOS como los que tripulaban el transbordador espacial *Atlantis* en enero de 1997, quizá no se mostrarían tan alegres durante un viaje de seis meses a Marte.

psicología y el comportamiento de los grupos aislados. Lo que se pretende es determinar procedimientos objetivos para reconocer los fallos funcionales, señala Dinges, director asociado del grupo. Los estudios anteriores se basaban en los propios informes de los astronautas, que a veces encubren aspectos esenciales. Según Dinges, un profesional bien adiestrado es capaz de decir que

se halla perfectamente aunque esté hecho una lástima.

Todo esto puede parecer obvio, pero es notable la cantidad de gente que sobrestima su capacidad, o simplemente que no se prepara bien. Algunos de los seis primeros astronautas americanos que se embarcaron en la Mir no llevaban bastante material para ocupar su tiempo libre, lo que dio lugar a agitación y altercados en la cabina. Thomas juró no volver a cometer ese error. Se llevó lápices y papel y adoptó el dibujo como nueva afición. "Es una vía de escape psicológica cuando no puedes escaparte físicamente", afirma.

Thomas dirige el desarrollo de un nuevo programa de adiestramiento de la NASA para adiestrar a los astronautas frente a los retos psicológicos que les esperan en el espacio. En el marco de su programa, un grupo de astronautas se ha encerrado durante 10 días en un remoto lugar de las inmensidades canadienses para realizar tareas en equipo.

Stuster insiste en que el entorno físico adecuado es esencial para realizar largas tareas en el espacio. "La capacidad de adaptación del ser humano es increíble", señala, "pero no queremos someterle a condiciones duras". En el nuevo Centro de Diseño de Habitabilidad de la NASA en Houston, cuatro arquitectos ayudan a un equipo de ingenieros a concebir camarotes individuales para la tripulación de la Estación Espacial Internacional. Llevará ésta adheridos a su pared interior unos módulos abatibles insonorizados, provisto cada uno de mesa de aluminio y equipo de dormir. Los astronautas podrán personalizar su diminuto refugio con libros y fotografías sujetos por bandas Velcro y cuerdas anudadas. Una disposición similar podría ofrecer un desahogo privado a los exploradores en viaje a Marte.

Por encima de todo, la acertada selección de los tripulantes es la clave del éxito de la misión. El historial de cada persona puede indicar sus posibilidades de resistencia. Pero quizá no pueda conocerse su comportamiento hasta que no se les dé la oportunidad de convivir dentro de un grupo. "Hay gente que probablemente no debería ir", dice el astronauta del A*polo 17* Harrison Schmitt. "Si quieres probarlo, enciérralos 90 días en una estación espacial."

LOS INVASORES DE HOLLYWOOD

Gracias a Pathfinder *y otras misiones, la ciencia ha adquirido cierto prestigio entre los oropeles del cine*

Philip Yam

Sentado en la primera fila de una sala en penumbra donde se proyectan "boletines diarios" —metraje primario obtenido de las tomas recientes— hay un hombre que nadie asociaría con el resplandeciente mundo de la fábrica de sueños. Entrando en este estudio de Vancouver con un vulgar atuendo de camisa polo verde, pantalones caqui y zapatillas deportivos, Matthew P. Golombek podría ser tomado por un joven profesor que se dirigía a su clase pero se equivocó de autobús. En realidad, como científico del proyecto para la misión *Pathfinder* de la NASA en 1997, tal vez sea lo que en la Tierra más se aproxime a un residente marciano. Disney le ha llamado para que asesore su película *Mission to Mars*. Durante el rodaje de la cinta, en la que Gary Sinise, Jerry O'Connell y Connie Nielsen interpretan a exploradores en marcha hacia el planeta rojo, Golombek no puede reprimir sus comentarios: "Eh, estos científicos tienen buen aspecto, esto no es real."



1. MARTE EN LA TIERRA: El habitáculo recreado en la película *Mission to Mars* aparece como si realmente hubiera sufrido los embates de una tormenta de polvo. Para pintar el suelo se aplicaron 450.000 litros de pintura látex.

La precisión científica no figura entre las preocupaciones fundamentales de Hollywood. Sin embargo, siempre se han incorporado expertos en los filmes de fantasía científica. Incluso en la época dorada del género, los años cincuenta, "en películas que hoy nos dan risa, había asesores para aumentar la verosimilitud", explica Vivian Sobchak, de la Universidad de California en Los Angeles. Además, como ella advierte, los directores a menudo intercalan documentales cortos en sus películas, como aquel film clásico sobre el ataque de hormigas mutantes, que incorporaba un breve documental sobre esos insectos.

Los modernos efectos especiales facilitan más que nunca la filmación de películas de contenido científico. En *Mission to Mars* los espectadores pueden percibir hasta cierto

punto lo que supondría viajar al planeta y sobrevivir allí —desde la ingravidez hasta las terribles tormentas de polvo— así como las principales razones científicas de tal viaje, es decir, la búsqueda de vida. Leyeron el guión Golombek y los astronautas Story Musgrave y Kathryn Clark, y luego analizaron los aspectos técnicos con los responsables de la película.

Lo que deja boquiabierto al visitante es el plató exterior de 22 hectáreas montado en las Fraser Sand Dunes, al sur de Vancouver. Para decorarlo se han descargado toneladas de guijarros y miles de metros cuadrados se han cubierto de hormigón pulverizado; para colorear de rojo "marciano" las dunas, se han aplicado con mangueras de incendio 450.000 litros de pintura látex ambientalmente inocua. El paisaje parece salido de las famosas fotografías del *Pathfinder*.

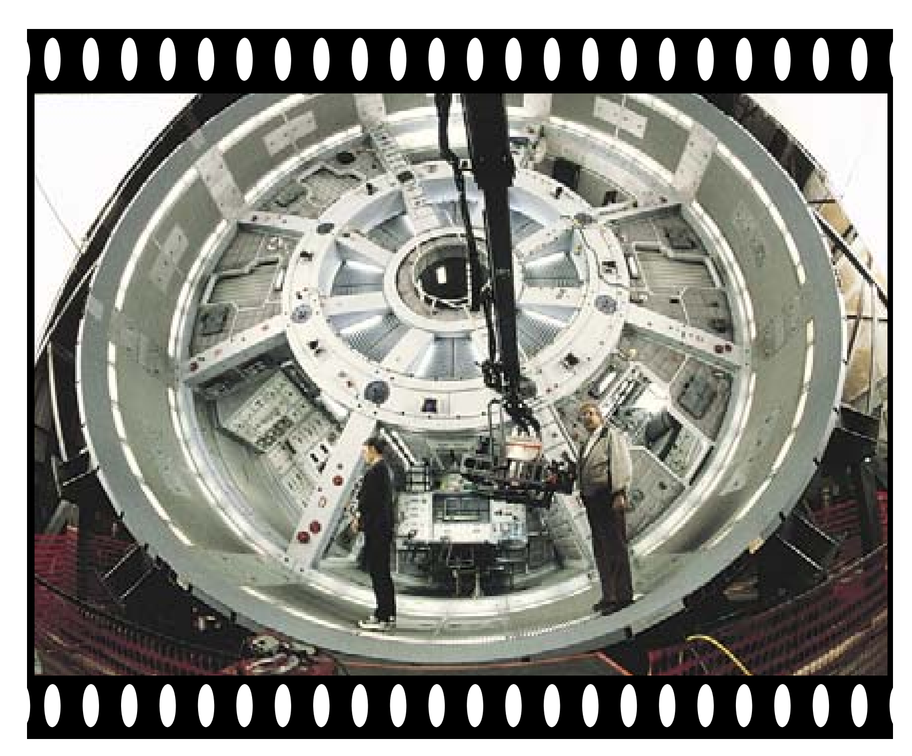
Por supuesto, cabe esperar ciertas licencias escénicas en la ficción. Para empezar, en la película se emprende una expedición de rescate a los pocos meses de haber ocurrido un desastre en el primer aterrizaje marciano. Tal rescate no podría intentarse en la realidad, como advierte Golombek: la Tierra y Marte están en alineación orbital sólo una vez cada 26 meses. Así, salvo que hubiera un importante progreso en la propulsión espacial, los pioneros de Marte habrán de valerse por sí mismos. En una expedición tripulada real, la NASA debería enviar primero robots para construir una infraestructura en el planeta o sus aledaños. Entonces, si ocurriera una emergencia, la tripulación podría disponer fácilmente del equipo esencial.

La película también presenta una nave autónoma que es relanzada por Marte en su camino hacia Saturno. Esto es inverosímil, según Golombek: dado el pequeño tamaño de Marte no tiene mucho sentido utilizar su campo gravitatorio para acelerar una sonda. Los astronautas emprenden un crítico paseo espacial hasta dicha nave desde su vehículo, dañado por el impacto de un micrometeorito. En la realidad, el blindaje metálico puede proteger contra esos objetos. Una vez a bordo de la nave, los astronautas bajan a la superficie, cosa muy improbable puesto que un robot no estaría preparado para ser controlado por el expedicionario ni podría aterrizar con seguridad.

Puede que sea difícil para los realizadores de cine recrear cada uno de los nuevos detalles científicos. Según Golombek, la superficie de Marte no es roja en puridad: la mejor información disponible sugiere que el terreno es probablemente de un marrón amarillento, si bien sus matices varían con la zona geográfica. No obstante, la mayoría de la gente ve rojo el planeta, puesto que el rojo es el color primario que más se aproxima.

Las restricciones de presupuesto conducen a otros compromisos, obligando en este caso a construir modelos a escala reducida. Los camarotes del vehículo de rescate forman parte de una estructura de casi 16 metros de diámetro que gira para simular la gravedad terrestre. Pero, como señala Clark, dada la velocidad de rotación representada en la película, el brazo del péndulo debería ser mucho más largo, lo que haría que la estructura entera resultase excesivamente grande para el estudio. La rueda plantea, sin embargo, una cuestión interesante: ¿Cómo responde el cuerpo humano a diferentes fuerzas de gravedad, *g*, aplicadas simultáneamente? Los pies sentirían una *g* algo mayor que la cabeza, ligeramente más próxima al centro de la rotación. Clark confiesa que todavía no existen datos sobre tales efectos.

Para Golombek, las exageraciones no merman el verdadero valor de la película: hacer sentir la aventura que supone la exploración marciana y entusiasmar al público. Hay que perdonar los artificios. Las películas no serían tan divertidas si se sujetaran rigurosamente a las verdades científicas. Y Hollywood hace una propaganda mucho más eficaz de los trabajos de la NASA que la propia organización.



2. LOS CAMAROTES GIRATORIOS de la nave espacial, para ser fieles, tendrían que ser mucho mayores si se propusieran simular la gravedad reinante en la Tierra o Marte.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BOLD ENDEAVORS: LESSONS FROM POLAR AND SPACE EXPLORATION. Jack Stuster. Naval Institute Press, 1996.

THE CASE FOR MARS: THE PLAN TO SETTLE THE RED PLANET AND WHY WE MUST. Robert Zubrin y Richard Wagner. Simon & Schuster, 1997.

PROCEEDINGS OF THE FOUNDING CONVENTION OF THE MARS SOCIETY. Preparado por Robert Zubrin y Maggie Zubrin, Univelt, 1999.

Puede conseguirse información adicional sobre las misiones a Marte en las direcciones www.marsacademy.com, www.thinkmarsnet, http://www.nsbri.org y members.aol.com/dsfportree/explore.htm en la Web.

Proteasas y cáncer

Estas enzimas desempeñan una función esencial en el cáncer, porque promueven el crecimiento de los tumores y fomentan la formación de metástasis

Carlos López Otín

Las proteasas son enzimas proteolíticas. Degradan, pues, total o parcialmente las proteínas. Y pueden hacerlo porque hidrolizan los enlaces que mantienen unidos entre sí a los aminoácidos, los bloques moleculares que construyen las proteínas de todos los organismos vivos.

Imaginemos por un instante una vida sin proteasas. Lo primero que nos viene a la mente es una sensación de indigestión: las proteínas de la dieta no se degradarían en el estómago y no podríamos obtener energía para sobrevivir. Esta función digestiva de las proteasas contribuyó, hace más de 150 años, a la identificación y caracterización de estas proteínas en el jugo gástrico de animales de experimentación.

Con el tiempo hemos ido conociendo mejor la significación biológica de las proteasas. Se les concede un papel central en la coagulación sanguínea y la cicatrización de heridas, la ovulación y la fertilización, la implantación y el desarrollo de los embriones, la formación de los huesos, la adquisición de recuerdos o la ejecución de los programas de apoptosis o suicidio celular. Tan impresionante diversidad funcional fue adquiriéndose a lo largo de miles de años de evolución biológica. Las proteasas involucradas en todos estos procesos actúan mediante sistemas en cascada, se combinan de manera muy variopinta y multiplican en consecuencia sus efectos biológicos.

Dado su enorme potencial destructor, hemos de suponer que la actividad enzimática de las proteasas se halla sujeta a una estricta regulación jerárquica. Cuando los mecanismos de control se alteran y las proteasas se forman en exceso, a destiempo o donde no procede, aparecen la artritis, la aterosclerosis, el cáncer y otros procesos patológicos de similar tenor.

En los últimos años se han acumulado las pruebas de la participación de las proteasas en el comportamiento invasivo y metastásico de las células tumorales. La capacidad de formación de metástasis es la característica más letal de los tumores malignos. Una vez que las células tumorales alcanzan el torrente sanguíneo y se propagan por el cuerpo, la progresión tumoral se torna prácticamente irreversible.

Por ello, parte de la investigación sobre el cáncer se centra en los mecanismos moleculares que conducen al desarrollo de metástasis. El proceso de formación de metástasis, un fenómeno muy complejo, consta de una serie de etapas secuenciales. Comporta la interacción entre células tumorales y componentes específicos de la matriz extracelular, la destrucción local de esa matriz y la migración activa de las células cancerosas a sitios distantes.

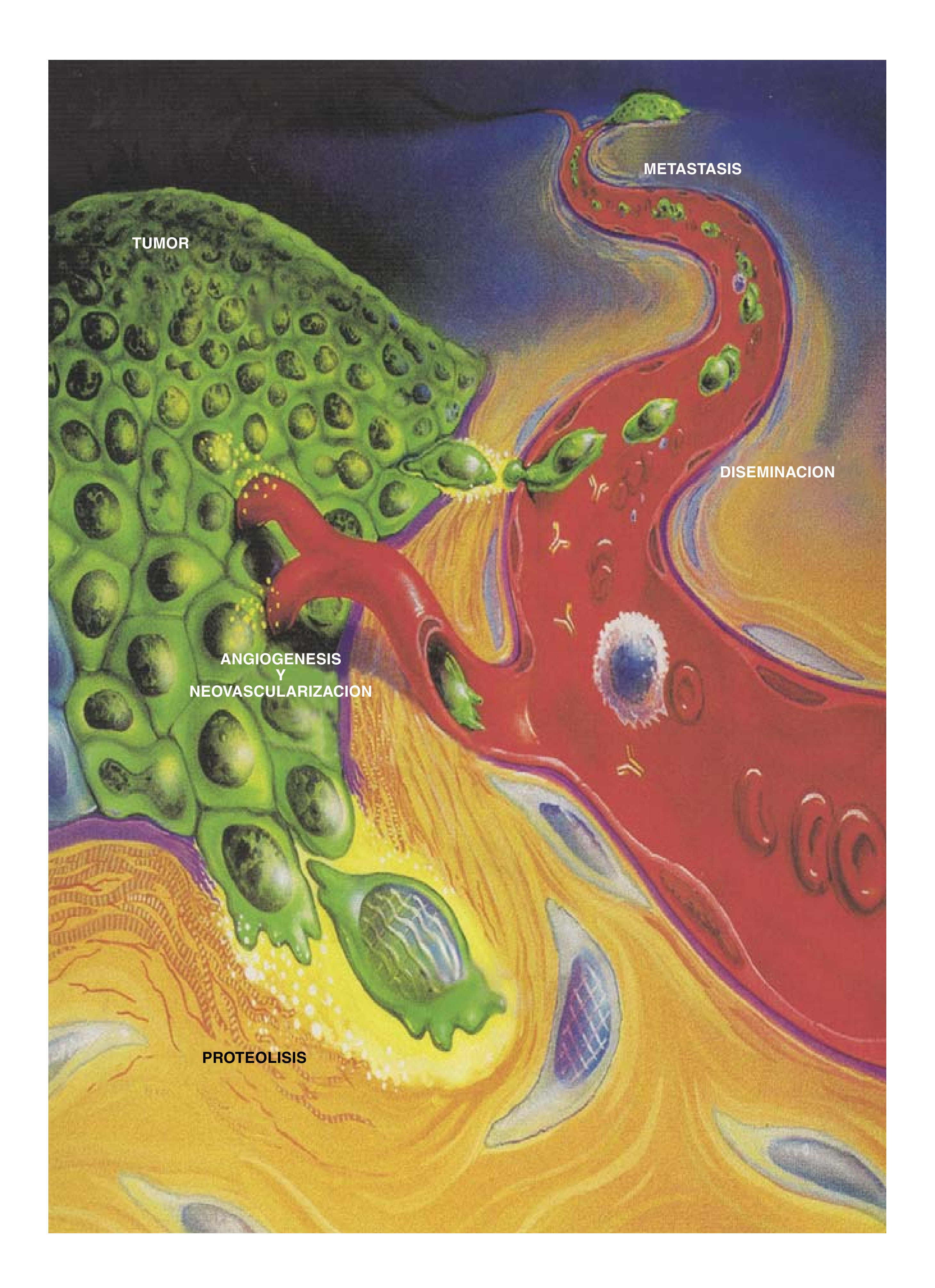
Aunque estamos lejos de conocer los mecanismos subyacentes bajo cada una de las tres fases del proceso metastásico, se ha avanzado bastante en el desentrañamiento de la segunda etapa, es decir, en la degradación de la matriz extracelular adyacente a las células tumorales que posibilita su posterior migración y diseminación. Tal proceso destructivo tiene lugar a través de la acción concertada de proteasas, en especial, de las metaloproteasas de matriz extracelular, o MMP.

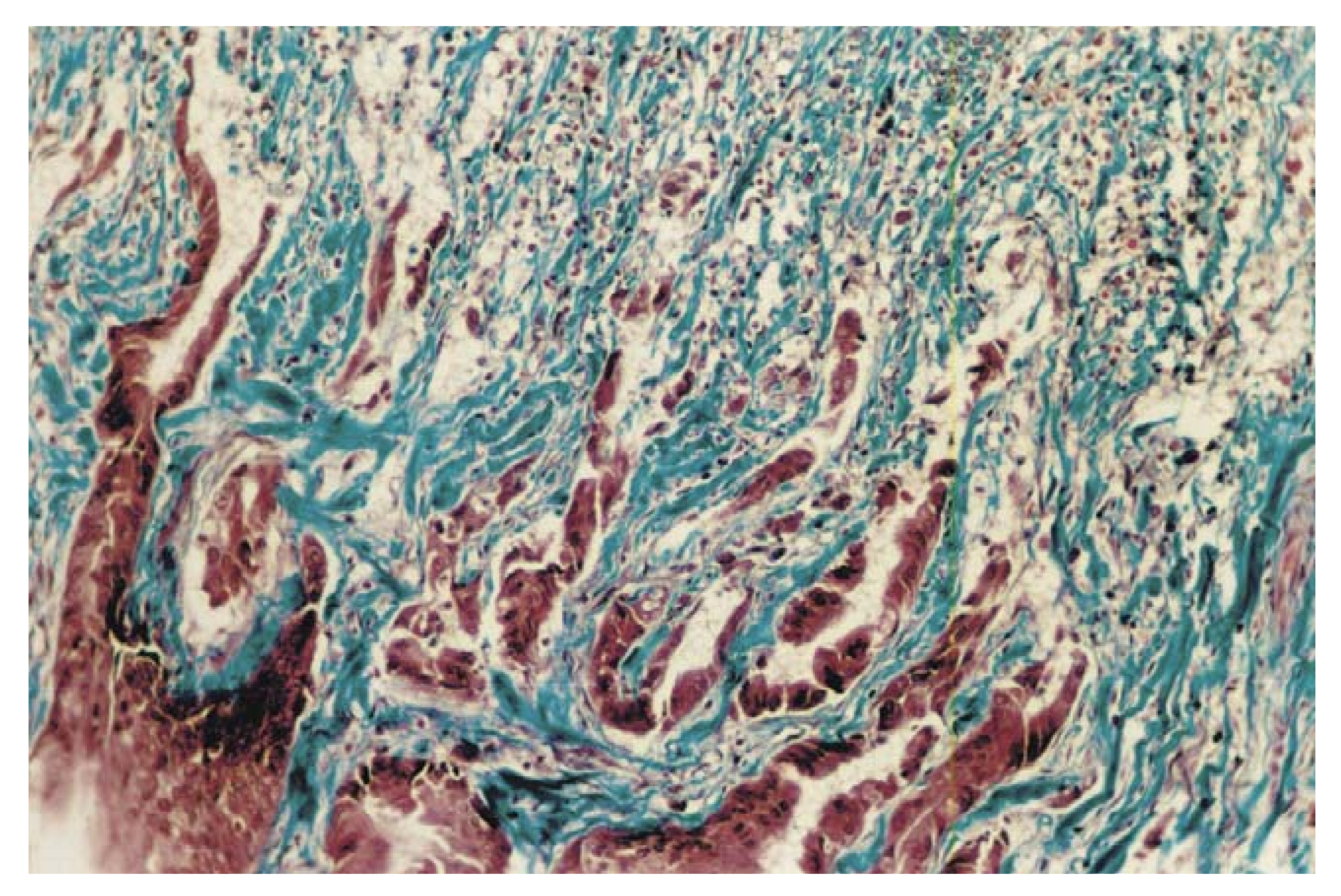
Las proteínas de la familia de las MMP guardan mutuo parentesco estructural y funcional, actúan a *p*H neutro y participan en los procesos fisiológicos que exigen la remodelación de los tejidos. Experimentan esta reconfiguración el desarrollo embrionario, el crecimiento y la reabsorción óseos, la ovulación y la involución uterina post-parto.

Las MMP se reparten en cuatro subfamilias: colagenasas, gelatinasas, estromalisinas y metaloproteasas de membrana (MT-MMP). Las colagenasas rompen la triple hélice de los colágenos fibrilares; las gelatinasas degradan los colágenos de tipo IV y el colágeno desnaturalizado; pueden actuar de forma sinérgica con las colagenasas en la degradación de colágenos fibrilares. Las estromalisinas destruyen muchas proteínas extracelulares, incluidos los proteoglicanos, la laminina y la fibronectina. Finalmente, las MT-MMP tienen un espectro de acción muy restringido y hasta el

CARLOS LOPEZ OTIN, catedrático de bioquímica y biología molecular en la Universidad de Oviedo, ha dedicado largos años al estudio de la implicación de las proteasas en el cáncer. Tras doctorarse completó su formación en el Centro de Biología Molecular "Severo Ochoa" de Madrid y en las universidades de Lund y Nueva York.

1. INVASION TUMORAL Y METASTASIS. Las células tumorales abandonan el tumor primario y atraviesan la matriz extracelular circundante. Para conseguirlo, se valen de proteasas que destruyen el tejido local. Introducidas en el torrente sanguíneo, algunas células tumorales alcanzan puntos remotos del organismo, donde se asientan, multiplican y desarrollan tumores secundarios. Para alimentar esa metástasis hay que forjar nuevos vasos sanguíneos en un proceso conocido por angiogénesis. (Figura modificada de Research Products Catalog, Oncogene Products, CN Biosciences Company.)


METASTASIS
TUMOR
DISEMINACION
ANGIOGENESIS
Y
NEOVASCULARIZACION
PROTEOLISIS



2. CANCER INVASIVO DE INTESTINO GRUESO. En el tejido conjuntivo de la pared intestinal (*azul*) penetran hileras de células tumorales (*rojo*), que, tras perder el control de su crecimiento, avanzan invadiendo el tejido sano y provocando en último término la diseminación del tumor. (Cortesía de A. M. Merino.)

momento sólo se conoce su participación en la activación proteolítica de otras metaloproteasas de matriz extracelular.

La extraordinaria capacidad de las MMP para degradar los componentes de la matriz extracelular a *p*H fisiológico convertía a estas enzimas en candidatas idóneas para intervenir en la destrucción hística que acompaña al cáncer.

En los años setenta se iniciaron los trabajos para cribar esa posibilidad. El grupo encabezado por Lance Liotta, del Instituto Nacional del Cáncer en Bethesda, detectó la presencia de potentes actividades colagenolíticas en tumores epiteliales y mesenquimales. Observó que las células metastásicas de un carcinoma murino mostraban una mayor capacidad para degradar el colágeno que las células del tumor primario.

Al propio tiempo se describió la síntesis de colagenasas por líneas celulares de osteosarcomas y carcinomas mamarios humanos, cuya actividad era bloqueada por una proteína de cartílago, un tejido resistente a la invasión por células neoplásicas.

En estos estudios se abordaba por primera vez la degradación proteolítica de componentes específicos de la matriz extracelular, actividad que se relacionó con la conducta agresiva de subpoblaciones específicas de células tumorales. Se aportaban, además, las primeras pruebas del interés terapéutico de la inhibición de la actividad proteolítica para el bloqueo de la diseminación tumoral. Otros equipos se ocuparon de la identificación y caracterización estructural y funcional de las MMP responsables, en potencia, de las actividades proteolíticas detectadas durante la progresión tumoral.

Pero no tardó en comprobarse cuán duro y complejo era el problema. El número de proteasas asociadas al cáncer superaba el esperado, justificable tal vez por la diversidad de sustratos a degradar por esas enzimas. Además, y pese a que las MMP parecían ser las proteasas idóneas para desempeñar estas funciones (por la naturaleza de sus sustratos y por el *p*H neutro al que actúan), comenzó a sugerirse la intervención de nuevas proteasas en el desarrollo del cáncer.

Se abría el abanico. Al estudio de las metaloproteasas se sumó el de las cisteín-proteasas —catepsinas B y L—, el de las serín-proteasas —activadores del plasminógeno— y el de las aspartil-proteasas, como la catepsina D.

Nuestro laboratorio en la Universidad de Oviedo se centró en la búsqueda de proteasas asociadas a procesos tumorales humanos y en el estudio de sus funciones en la progresión tumoral. La labor experimental realizada en torno al análisis de las proteasas tumorales nos ha permitido identificar nuevas enzimas hidrolíticas, que operan en tejidos tumorales.

Hay, entre estas enzimas, algunas metaloproteasas, cisteín-proteasas, serín-hidrolasas y aspartil-proteasas descubiertas y caracterizadas por los integrantes de nuestro grupo ovetense y especialmente por José P. Freije, Iñigo Santamaría, Xosé S. Puente y Elena Llano. Además, puesto que uno de los aspectos esenciales del

control de la actividad proteolítica es su inhibición por proteínas endógenas específicas, nos hemos propuesto identificar inhibidores que bloqueen la actividad de las proteasas asociadas a tumores. En esa línea se han encontrado dos nuevas proteínas humanas, TIMP-3 y cistatina D, que resultaron ser inhibidores específicos de metaloproteasas y cisteín-proteasas, respectivamente.

Una parte sustancial de nuestro trabajo sobre las proteasas asociadas a tumores se ha centrado en la caracterización de la que denominamos colagenasa-3. Los análisis preliminares sugerían que esta enzima podía revestir interés en el cáncer y en procesos patológicos que, como la artritis, van acompañados de una importante destrucción hística.

Al hilo de la exposición de nuestro trabajo sobre la colagenasa-3 iremos tejiendo un modelo de la implicación de las proteasas en el cáncer. Descubrimos la colagenasa-3 en 1994. Buscábamos enzimas que justificaran la agresividad de ciertos carcinomas mamarios. Basamos la estrategia de trabajo en el uso de la reacción en cadena de la polimerasa. La RCP permite multiplicar indefinidamente minúsculas cantidades de material genético.

Trabajamos con muestras de ARN de carcinomas de mama. Utilizamos como cebadores de la multiplicación ("amplificación") pequeños fragmentos de ADN constituidos por 20 nucleótidos. Para escoger la secuencia de bases nitrogenadas de los cebadores, nos fijamos en las regiones comunes de las proteasas de una misma familia. Conocida la secuencia aminoacídica de esas regiones podemos sintetizar los oligonucleótidos que las cifran y emplearlos para multiplicar el material genético correspondiente a proteasas de la misma familia presentes en las muestras tumorales.

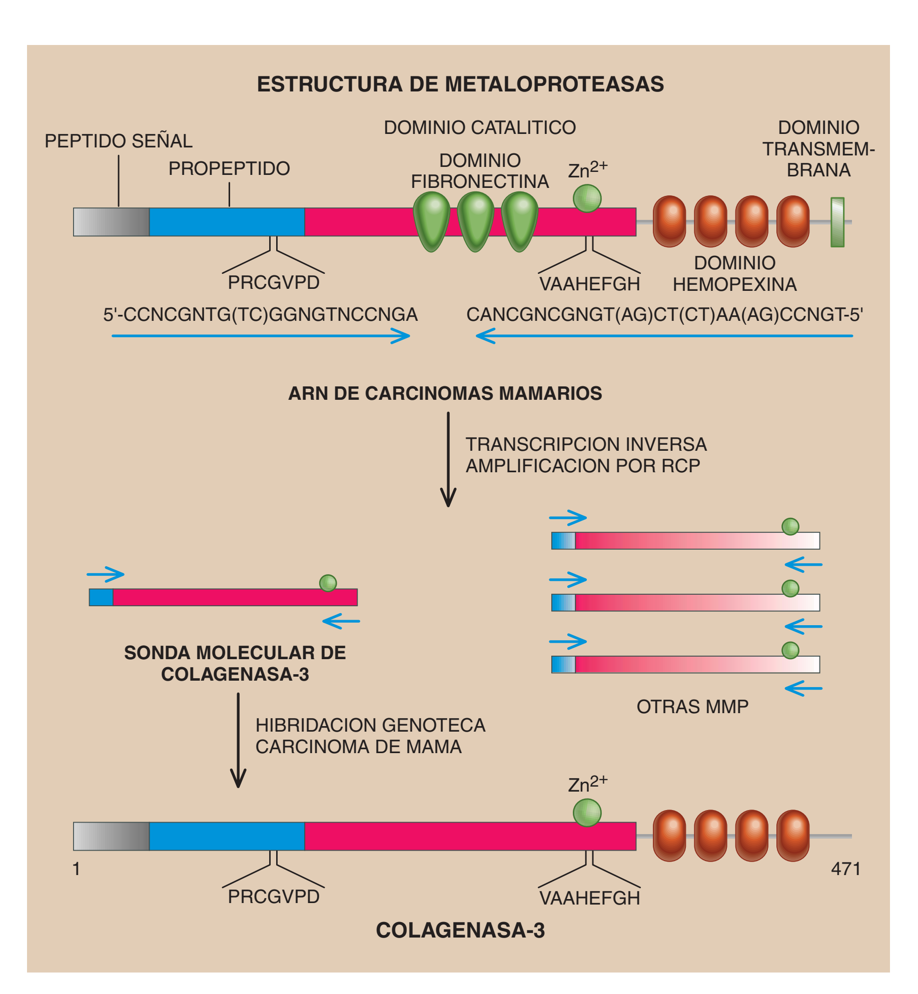
Así llegamos hasta la repetición iterada de un fragmento de ADN cuya secuencia de nucleótidos era, en parte, semejante a los que determinan las proteasas de la familia de las MMP y, en parte, distinta de todas ellas. El material "amplificado" con la técnica RCP sirvió de sonda para aislar clones completos de una genoteca de ADN complementario, preparada a partir de ARN tumoral mamario.

La secuencia de nucleótidos de los clones aislados reveló la existencia de una nueva MMP, con características estructurales similares a la colagenasa de fibroblastos y la colagenasa de neutrófilos, ya conocidas. De ahí que al tercer componente de esta subfamilia de MMP le diéramos el nombre de colagenasa-3.

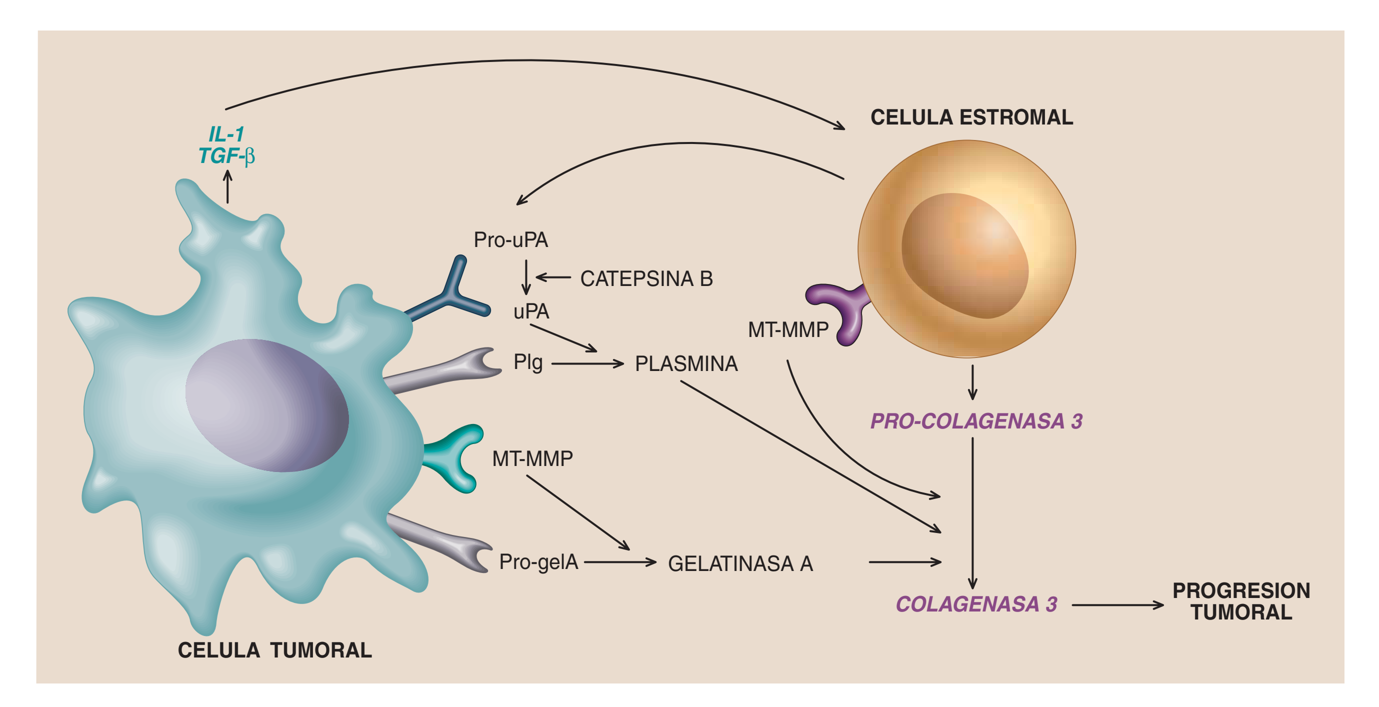
Lo mismo que la mayoría de las proteasas identificadas, la colagenasa-3 se sintetiza en pequeñas cantidades. El organismo tiende a mantener siempre bajo control el poder destructivo de estas enzimas. Por culpa de la mencionada parquedad, costaba mucho llegar a la purificación y caracterización molecular de la nueva enzima, descubierta en carcinomas de mama humanos.

Para determinar sus propiedades bioquímicas, tuvimos que producir la proteína en sistemas de expresión *in vitro* diseñados a tal efecto. Mediante técnicas de ingeniería genética insertamos el ADNc (preparado a partir de ARN del carcinoma de mama), que cifra la colagenasa-3 humana en un plásmido preparado por Rafael Blasco, del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias de Madrid. Este plásmido permite la introducción de genes extraños en el virus de la vacuna. Creamos, así, un virus recombinante portador del ADNc de la colagenasa-3.

Se inoculó el virus en células animales. En principio, la célula infectada con genoma vírico modificado debía sintetizar colagenasa-3 humana. Eso



3. IDENTIFICACION Y CLONACION de la colagenasa-3 en carcinomas mamarios humanos. El análisis estructural de las metaloproteasas de matriz extracelular reveló la presencia de dos secuencias de aminoácidos que persistían en todas esas proteínas. Las secuencias pertenecían a dos dominios estructurales característicos de las proteasas: el pre-dominio con un residuo de cisteína esencial para el mantenimiento de su latencia, y el sitio de unión al zinc dentro del dominio catalítico. Tras sintetizar una mezcla de todos los oligonucleótidos necesarios para cifrar ambas secuencias peptídicas, se utilizaron en experimentos de RCP para amplificar ARN de carcinomas de mama. El fragmento de material genético extraído de un tumor y multiplicado sirvió de sonda en una genoteca de ADNc preparada a partir de ARN del mismo carcinoma. Tras la hibridación con dicha sonda, se seleccionó un clon de ADNc que portaba la información necesaria para cifrar una nueva proteasa, constituida por 471 aminoácidos y a la que, de acuerdo con sus características estructurales, se denominó colagenasa-3.



4. PRODUCCION DE PROTEASAS mediante procesos de interacción entre células tumorales y células normales circundantes. La interleuquina-1 y el factor de crecimiento TGF-β, liberados por las células tumorales, inducen la producción de colagenasa-3 por las células estromales fibroblásticas adyacentes. Una vez sintetizada en su forma precursora, inactiva, la molécula de proteasa se activa en un proceso proteolítico en cascada, que se desarrolla en la membrana de las células tumorales. La proteasa activada degrada la matriz extracelular e inicia el proceso de invasión y metástasis.

fue lo que ocurrió. Se sintetizó una cantidad abundante de colagenasa-3, fácilmente purificable del medio de cultivo e indistinguible de la colagenasa-3 fabricada por las células humanas.

La proteína recombinante se incubó con diferentes proteínas que componen la matriz extracelular de los tejidos humanos. Pretendíamos con ello determinar cuáles de ellas podían ser susceptibles a la acción degradativa de la enzima. Los resultados obtenidos, junto con trabajos adicionales de Vera Knäuper y Gillian Murphy, de la Universidad East Anglia en Norwich, demostraron que esta proteasa era una enzima muy potente. No sólo degradaba los colágenos fibrilares (como cabía esperar de acuerdo con su pertenencia manifiesta a la subfamilia de las colagenasas), sino también fibronectina, tenascina y colágeno tipo IV, proteínas de la matriz extracelular.

Esa vigorosa actividad degradativa se compaginaba bien con la intervención de la colagenasa-3 en la destrucción de tejido conjuntivo, que acompañaba a la progresión tumoral. Del análisis comparativo de su actividad enzimática con la de las otras dos colagenasas humanas se infería, además, que cada una de ellas poseía un sustrato preferente. Así, la colagenasa-3 era más activa frente a colágeno tipo II, la colagenasa de fibroblastos degradaba preferentemente colágeno tipo III y la colagenasa de neutrófilos hacía lo propio con colágeno de tipo I.

Las colagenasas habían evolucionado para degradar tejidos que diferían en su contenido de colágenos fibrilares. En el caso de la colagenasa-3 su actividad normal tendría que ver con el metabolismo del cartílago articular, un tejido rico en colágeno tipo II. Y eso lo confirmamos más tarde. Nuestro laboratorio y otros de EE.UU., Canadá, Suecia y Finlandia han demostrado que la colagenasa-3 es una enzima sintetizada por condrocitos durante el desarrollo fetal y en la artrosis y la artritis, enfermedades articulares degenerativas.

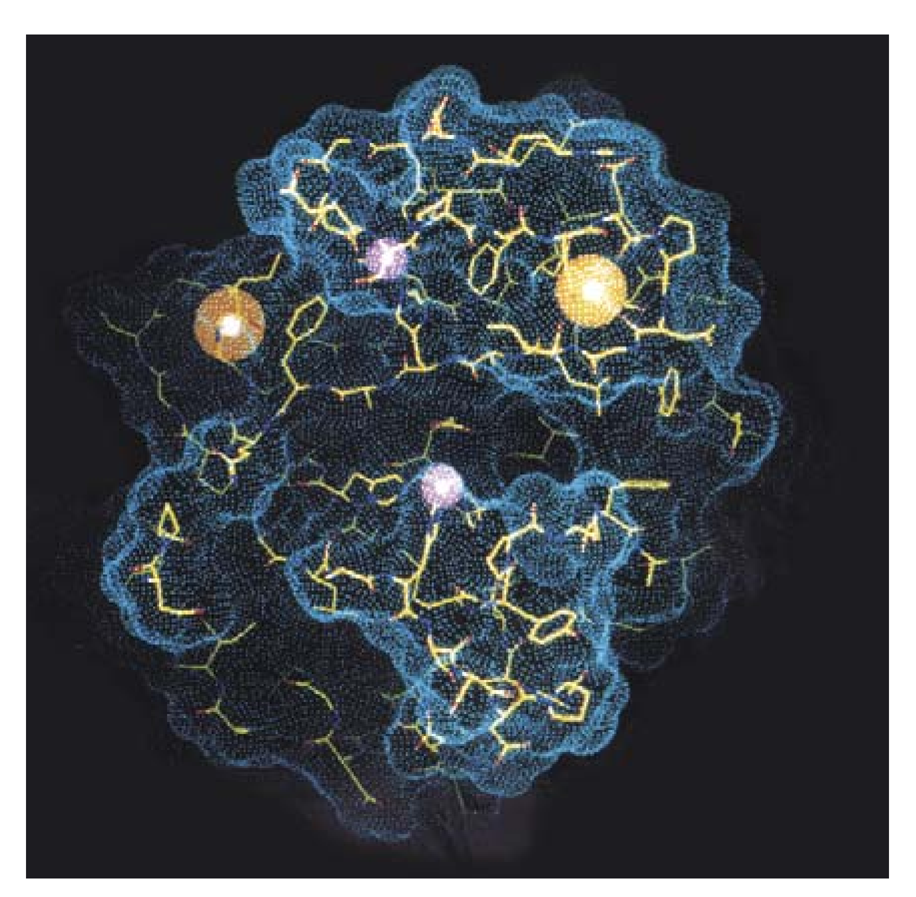
Tras la caracterización bioquímica de la colagenasa-3 acometimos el estudio de su expresión en tejidos normales y tumorales. Observamos que la enzima se expresaba en un porcentaje significativo de carcinomas mamarios, pero nunca en tumores benignos, ni en ningún tejido normal adulto. Milagros Balbín, María J. Jiménez y José M. López, de nuestro equipo, en colaboración con Mona

Proteasas asociadas a procesos tumorales

ENZIMAS	INHIBIDORES NATURALES	INHIBIDORES SINTETICOS
Metaloproteasas		
Colagenasas, Estromalisinas, Gelatinasas, MT-MMP	TIMP-1, TIMP-2, TIMP-3, TIMP-4	Batimastato, Marimastato, Ro 31-9790, CGS 27023A
Serín-proteasas		
Activadores del plasminógeno Antígeno específico de próstata (PSA)	PAI-1, PAI-2	FOY 305, TAPP-Br, FUT 175
Cisteín-proteasas		
Catepsinas B, L, L2, O, Z Caspasas Bleomicín hidrolasa	Cistatinas A, B, C, D, E, F, M, S IAPs	E-64, Agentes alquilantes
Aspartil-proteasas		
Pepsinógeno C Catepsina D	Pepstatinas	

Stahle-Bäckdahl, del Hospital Karolinska de Estocolmo, determinaron que sólo durante el desarrollo embrionario se detectaba la presencia de la colagenasa-3 en los osteoblastos y condrocitos hipertróficos que participaban en la formación del hueso, lo que inducía a sospechar la implicación de la proteasa en el proceso de osificación fetal.

La ausencia de la enzima en tejido mamario normal o en tumores benignos, junto con su presencia en tumores malignos, parecía corroborar la hipótesis de la intervención de la colagenasa-3 en el cáncer de mama. Sin embargo, un análisis más fino de los tumores productores de colagenasa-3, realizado con técnicas de hibridación *in situ*, nos permitió comprobar que el gen de la proteasa se expresaba en el tejido estromal sano que rodeaba a las células tumorales, sobre todo en el frente invasivo del tumor, pero no en las propias células epiteliales tumorales.



5. ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL de la colagenasa-2 humana. Las dos esferas grandes corresponden a los iones de zinc, esenciales para el funcionamiento de la metaloproteasa. Las dos menores corresponden a los dos iones de calcio que se asocian a este tipo de proteasas. En la parte central se observa una hendidura donde se acomoda el sustrato que va a ser hidrolizado por la proteasa. La resolución de las estructuras tridimensionales de las proteasas permite descifrar las claves de su funcionamiento y la naturaleza de sus sustratos. (Cortesía de X. Gomis-Rüth.)

Los nuevos resultados remedaban otros obtenidos antes por el grupo de Pierre Chambon, de la Universidad de Estrasburgo, para estromalisina-3, proteasa tumoral también. Sugerían que los tumores emitían señales moleculares que instaban en el tejido sano la síntesis de proteasas que iban a destruirlo, dejando una vía libre para la diseminación del tumor. Se evidenciaba así, una vez más, la amplitud de recursos que emplean los tumores para superar los obstáculos que encuentran a su paso.

La observación de que las células tumorales se sirven de las células normales para progresar refleja viejas tesis de la medicina hipocrática y galénica. Varios siglos antes de la era cristiana, Hipócrates adscribía la capacidad invasiva y destructora de los tumores a un desajuste entre los cuatro humores, desequilibrio que conducía a un exceso local de bilis negra (los otros tres humores eran la sangre, la flema y la bilis amarilla). Galeno, en el siglo II d.C., extendió la teoría hipocrática y propuso que la bilis negra se concentraba en las regiones de invasión tumoral.

Desde una perspectiva actual, el desequilibrio humoral equivaldría a la pérdida del equilibrio entre los niveles de proteasas activadas y de sus inhibidores endógenos, causante de la destrucción de la matriz extracelular y, por ende, de la progresión tumoral. El "humor maligno" de la medicina clásica estaría, visto hoy, constituido mayoritariamente por proteasas como la estromalisina-3 o la colagenasa-3, que se concentran en las zonas de invasividad tumoral.

Pero volvamos a la colagenasa-3. Resultaba imprescindible determinar la naturaleza de las señales moleculares enviadas por los tumores a las células normales con el fin de que éstas sinteticen la enzima. Los trabajos acometidos en nuestro laboratorio por José A. Uría, con cultivos de fibroblastos y células epiteliales de carcinomas mamarios, han permitido identificar varios factores solubles capaces de estimular la producción de la colagenasa-3. De éstos, la interleuquina-1 y el factor de crecimiento TGF-β, una vez sintetizados y secretados por las células epiteliales tumorales, inducen la expresión de la colagenasa-3 en las células estromales inmediatamente adyacentes al tumor.

Tras la síntesis y activación de esta enzima a través de una cascada proteolítica, en la que intervienen las metaloproteasas MT1-MMP y la gelatinasa A, la colagenasa-3 participaría en la destrucción hística que acompaña a la progresión tumoral.

Se han venido recogiendo pruebas que vinculan la colagenasa-3 con la diseminación tumoral. Francisco Vizoso y otros investigadores de nuestro grupo han observado una estrecha relación entre la concentración intratumoral de colagenasa-3 y la evolución de la enfermedad. La expresión de colagenasa-3 está asociada con una menor supervivencia global de las pacientes con cáncer de mama, lo que constituye un indicio indirecto de la participación de la enzima en la progresión tumoral.

Resultados similares se han obtenido en carcinomas escamosos de laringe, condrosarcomas, carcinomas basocelulares de piel o diversos tumores de origen ginecológico, patologías que sobreexpresan la colagenasa-3.

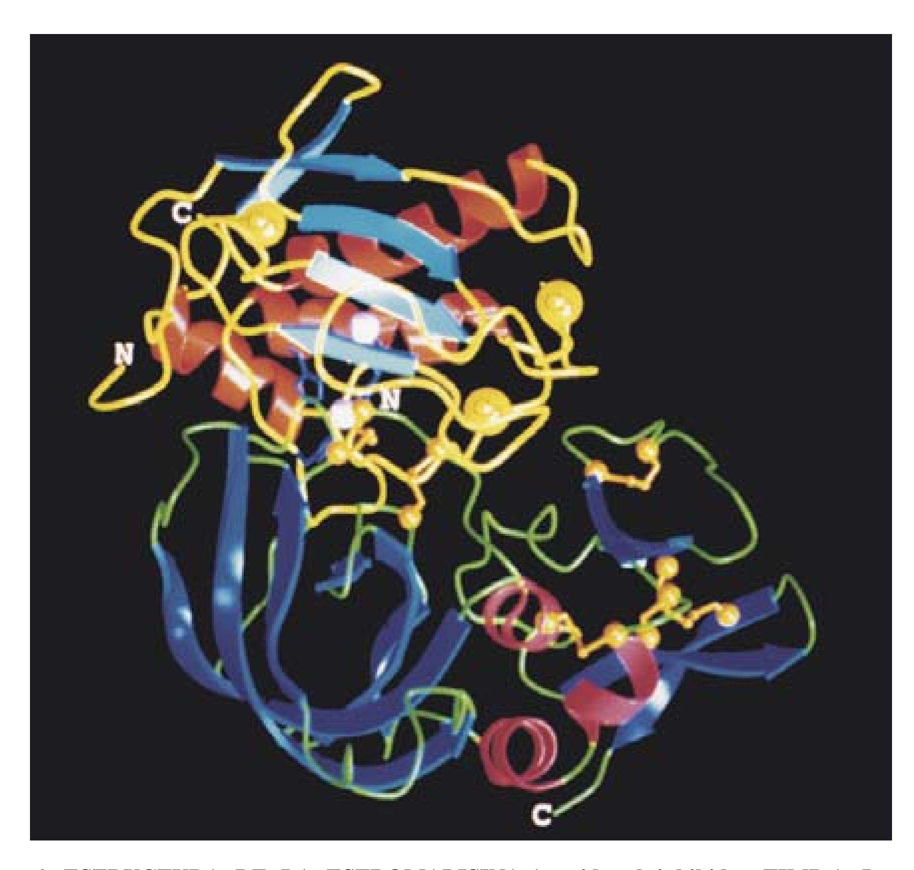
En todos los casos, la producción de la proteasa va asociada a una mayor agresividad local de los tumores, aunque varíen los mecanismos inductores de la síntesis enzimática según el tipo de tumor. En carcinomas de mama, los factores capaces de inducir la expresión serían el TGF-β o la IL-1, mientras que en condrosarcomas el bFGF tendría un efecto preeminente y en carcinomas de laringe actuarían el TNF-α y el TGF-α.

Abonan esa función en la progresión tumoral los experimentos con ratones transgénicos realizados por Alberto M. Pendás y Antonio Fueyo, de nuestro laboratorio, en colaboración con Miguel A. Vidal, del Centro de Investigaciones Biológicas de Madrid. Los animales, modificados para sobreexpresar el gen de la colagenasa-3 humana en la glándula mamaria, confirman la implicación de la proteasa en el desarrollo tumoral. Los carcinomas mamarios inducidos en ratones transgénicos aparecen mucho antes y tienen una mayor tasa de crecimiento que los correspondientes tumores inducidos en ratones normales.

A mayor abundamiento, el grupo encabezado por Zena Werb, de la Universidad de San Francisco, ha demostrado que oligonucleótidos antisentido, inhibidores de la síntesis de colagenasa-3, reducen la capacidad invasiva de células de carcinoma mamario murino.

En suma, la colagenasa-3 cumple los requisitos que cabía esperar de una proteasa implicada en el cáncer. Se trata de una enzima dotada de una actividad proteolítica diversa y potente, sintetizada en lugares donde no se exige su presencia y cuya capacidad destructora llega a degradar las proteínas que constituyen las barreras hísticas que tratan de impedir la progresión tumoral.

Pero la participación de las proteasas en el cáncer es plural y trasciende la idea intuitiva que asocia producción tumoral de proteasa a degradación hística y diseminación tumoral. Mencionemos, por ejemplo, el proteasoma, grupo de proteasas organizadas en un complejo multienzimático intracelular. Este sistema multienzimático desempeña un papel esencial en la regulación del ciclo celular, que es el conjunto de etapas por las que atraviesa una célula hasta que se divide. Por su lado, las proteasas caspasas intervienen en la ejecución de los programas de apoptosis, o muerte celular programada.



6. ESTRUCTURA DE LA ESTROMALISINA-1 unida al inhibidor TIMP-1. La estructura de la proteasa se muestra en color amarillo con las regiones en hélice-α en color rojo y las que poseen estructuras en hoja plegada-β, en color azul claro. La estructura del inhibidor se muestra en color verde, con sus regiones en hélice-α en rojo oscuro y las zonas con hoja plegada-β en azul oscuro. Los extremos amino- y carboxilo-terminal de ambas proteínas se indican con las letras N y C, respectivamente. (Cortesía de X. Gomis-Rüth.)

Puesto que la regulación del ciclo celular y la apoptosis tienen que ver con el cáncer, parece obvio que las alteraciones de las proteasas implicadas en ambos procesos pueden facilitar la oncogénesis. Las proteasas pueden, además, instar la angiogénesis o formación de nuevos vasos sanguíneos, imprescindible para el suministro de nutrientes a los tumores.

A este respecto, conviene recordar que la colagenasa-3 degrada los proteoglicanos que mantienen secuestrado al factor de crecimiento bFGF en la matriz extracelular. La destrucción de estos proteoglicanos libera dicho factor y pone en marcha los procesos de proliferación mediados por el bFGF. De esta forma, la colagenasa-3 y otras proteasas con actividades equivalentes, como las desintegrinas, contribuyen a la progresión tumoral.

No acaban ahí las relaciones entre proteasas y cáncer. Algunas de estas enzimas confieren resistencia contra la quimioterapia. En nuestro grupo, Adolfo A. Ferrando y Gloria Velasco han estudiado el proceder de la bleomicín-hidrolasa, en colaboración con el grupo de Elías Campo, del Hospital Clínico de Barcelona. Esa enzima es una cisteín-proteasa que, además de su función normal en el catabolismo proteico, degrada la bleomicina, un potente antibiótico que rompe el ADN y se utiliza como agente quimioterápico en el tratamiento de varios tumores humanos. Ante la observación de que en ciertos tumores de células escamosas o en linfomas de Burkitt había sobreexpresión de bleomicín-hidrolasa, hemos supuesto que la enzima prima la resistencia de estos tumores al tratamiento con bleomicina.

Por otra parte, cabe que la presencia de proteasas en tumores sea mero reflejo de las alteraciones hormonales asociadas al desarrollo de carcinomas mamarios, sin tener ninguna repercusión en sus propiedades invasivas. Acontece esa situación en el pepsinógeno C, precursor de una proteasa gástrica que también se sintetiza en carcinomas mamarios como demostró Luis M. Sánchez. Cumple a esta proteasa, una de las más potentes, degradar proteínas de la dieta en el estómago, función que auguraba, para el pepsinógeno C mamario, al-

Funciones de proteasas asociadas a procesos tumorales

PROTEASAS	FUNCIONES
MMP, catepsinas	Degradación de barreras hísticas: invasión y metástasis
MMP	Estimulación de la angiogénesis
Desintegrinas, MMP	Activación de citoquinas, hormonas y factores de crecimiento
Activadores del plasminógeno, MMP, catepsinas	Activación de cascadas proteolíticas
Pepsinógeno C, catepsina D, PSA	Marcadores bioquímicos de tumores hormono-dependientes
Caspasas	Ejecución de los programas de apoptosis
Bleomicín-hidrolasa	Resistencia a la quimioterapia
Componentes del proteasoma	Regulación proteolítica de la progresión del ciclo celular

guna contribución en la diseminación tumoral.

Pero Milagros Balbín, Antonio M. Merino y otros miembros del grupo de Oviedo han señalado que la expresión del pepsinógeno C en carcinomas de mama es una consecuencia de las alteraciones hormonales asociadas al desarrollo de los tumores mamarios, sin implicación directa en la destrucción de la matriz extracelular. En investigación más reciente hemos identificado un elemento de respuesta hormonal en el promotor del gen que cifra la proteasa pepsinógeno C. El elemento en cuestión, capaz de mediar en la inducción de este gen por andrógenos y glucocorticoides, es virtualmente idéntico al que existe en los genes del antígeno específico de próstata y de la kalicreína glandular, dos proteasas producidas en tejido prostático también identificadas en carcinomas mamarios.

Tomados en conjunto, estos trabajos avalan un probable paralelismo molecular entre los carcinomas de próstata y mama. Tal paralelismo se funda en la existencia de proteínas sobreexpresadas específicamente por tumores de ambos tipos, y cuyos genes presentan mecanismos de respuesta hormonal similares.

La tesis de la asociación entre proteasas y progresión de los tumores se está reforzando con nuevos avances, incluyendo el desciframiento de las conexiones moleculares entre la transformación celular y el incremento en la expresión de las proteasas. Se busca la relación causal explícita entre malignidad y actividad proteolítica.

En cualquier caso, se puede afirmar que ninguna proteasa, por sí sola, activa las propiedades invasivas y metastásicas de todos los tumores; antes bien, cada tipo de tumor utiliza distintas combinaciones de proteasas para facilitar su progresión. Así, además de metaloproteasas como la colagenasa-3 o la estromalisina-3, enzimas de otras clases como los activadores del plasminógeno o las catepsinas contribuyen en mayor o menor medida en el proceso de destrucción hística consustancial al desarrollo del cáncer.

Tampoco la actividad proteolítica directa sobre la matriz extracelular agota la vinculación de las proteasas con los tumores. Como hemos explicado, son enzimas que estimulan la migración celular, modulan la angiogénesis tumoral, actúan como factores mitogénicos y confieren resistencia a la quimioterapia.

En general, los niveles intratumorales de proteasas guardan correlación con una menor supervivencia global de los pacientes y con un menor intervalo libre de enfermedad. Por ello, se han introducido ya en clínica activadores del plasminógeno y ciertas MMP, como factores bioquímicos para ayudar a predecir la evolución tumoral.

La importancia de los inhibidores de proteasas, que impiden la progresión de los tumores malignos, ha sido apreciada por la propia naturaleza al dotar a los organismos de una amplia batería de inhibidores endógenos. Existen inhibidores específicos de las distintas subfamilias de proteasas: serpinas, que bloquean la actividad de las serín-proteasas; cistatinas, que actúan sobre las cisteín-proteasas, o los TIMP, inhibidores hísticos de metaloproteasas. Se ha observado que la adición de TIMP a cultivos de células de melanoma o fibrosarcoma bloquea la capacidad invasiva de estas células, tanto en sistemas *in vitro* como *in vivo*. Y se ha demostrado que la sobreexpresión de estos inhibidores en fibroblastos transformados con el oncogén *ras*, reduce la velocidad de crecimiento de los tumores e inhibe su capacidad invasiva.

Finalmente, la supresión de la expresión del TIMP-1 en fibroblastos murinos, mediante el empleo de ARN anti-sentido, confiere a estas células propiedades invasivas, tumorigénicas y metastásicas. Todas estas observaciones han estimulado el diseño de inhibidores sintéticos que remeden la operación de inhibidores endógenos. Se ha sintetizado una primera generación de inhibidores de MMP, algunos de los cuales ya se están utilizando en ensayos clínicos de tratamiento de tumores.

No obstante, el diseño de terapias antitumorales basadas en el empleo de inhibidores de proteasas ofrece todavía muchas limitaciones, derivadas, por un lado, de la diversidad de proteasas asociadas a los procesos tumorales y, por otro, de la dificultad de dirigir la terapia a las células apropiadas. Es de esperar que la resolución de la estructura tridimensional de las enzimas asociadas al cáncer y la mejor comprensión de los mecanismos implicados en su participación en la progresión neoplásica faciliten el diseño de inhibidores más específicos. Sin duda, estos fármacos contribuirán a aportar soluciones al problema esencial de los tumores malignos: su capacidad para romper las barreras hísticas y diseminarse a sitios distantes del organismo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

REGULATION OF COLLAGENASE-3 EXPRESSION IN HUMAN BREAST CARCINOMAS IS MEDIATED BY STROMAL-EPITHELIAL CELL INTERACTIONS. José A. Uría, Mona Stahle-Backdahl, Motoharu Seiki, Antonio Fueyo y Carlos López Otín, en *Cancer Research*, vol. 57, págs. 4882-4888; 1997.

MECHANISM OF INHIBITION OF THE HUMAN MATRIX METALLOPROTEINASE STROMELYSIN-1 BY TIMP-1. Franz-Xaver Gomis-Rüth, Klaus Maskos, Michael Betz, Andreas Bergner, Robert Huber, Ko Suzuki, Naoki Yoshida, Hideaki Nagase, Keith Brew, Gleb P. Bourenkov, Hans Bartunik y Wolfram Bode, en *Nature*, vol. 389, páginas 77-81; 1997.

MATRIX METALLOPROTEINASES. William C. Parks y Robert P. Mecham. Academic Press, 1998.

BREAST AND PROSTATE CANCER: AN ANALYSIS OF COMMON EPIDEMIOLOGICAL, GENETIC, AND BIOCHEMICAL FEATURES. Carlos López Otín y Eleftherios P. Diamandis, en *Endocrine Reviews*, vol. 19, págs. 365-396; 1998.

COLLAGENASES. Warren Hoeffler. R. G. Landes Company, 1999.

Las bromelias
DEL BOSQUE ATLANTICO

En la costa brasileña sólo queda un ocho por ciento del antaño floreciente bosque, donde hallan refugio bromeliáceas de especies muy diversas

Gustavo Martinelli
Fotografías de Ricardo Azoury

La costa de Brasil fue antaño un denso bosque húmedo, una maraña de vegetación que cubría 1,4 millones de kilómetros cuadrados y rivalizaba con la Amazonía en punto a biodiversidad. Hoy sólo quedan algunas franjas y retazos de la Mata Atlántica, o Bosque Atlántico. Del bosque original, sólo el ocho por ciento ha sobrevivido a los machetes de los cultivadores de caña de azúcar y café y a las hachas de los leñadores, y esa fracción se distribuye dispersa a lo largo de la pobladísima franja costera occidental. Parte está protegida en reservas, parte se halla en manos privadas y parte sobrevive en los aledaños de grandes urbes o incluso en su recinto. Estos retazos residuales de Mata Atlántica constituyen uno de los ecosistemas más amenazados de Brasil y el último refugio de muchos miembros de una extraña familia de plantas: las bromeliáceas.

Las bromelias, cuyos representantes más conocidos son la piña o el musgo español, destacan por su cromatismo y asombrosa diversidad. De los 56 géneros y 3146 especies y subespecies, más de la mitad son epífitos, es decir, sus raíces se hunden en troncos o rocas y captan la humedad del aire o de la bruma, ya que no del suelo. Algunos epífitos de éstos guardan agua en la roseta formada por sus hojas y dan así vida a microecosistemas. *Alcantarea imperialis*, especie de gran talla que medra en la parte herbosa de las montañas del sudeste de la Mata Atlántica, llega a almacenar treinta litros de agua. Se han descubierto más de 900 organismos —la mayoría insectos, aunque también ranas, cangrejos, gusanos y microorganismos— viviendo en estas hojas cisterna. A su vez, tales moradores y su dominio acuático proporcionan sustento a aves y monos, como el amenazado tamarino león.

En algunos casos, las bromelias y sus inquilinos parecen haber coevolucionado. La rana *Hyla venulosa* hiberna durante la estación seca del norte de Brasil dentro de *Billbergia zebrina*. Al reptar dentro de la cavidad de la bromelia y volver la cabeza ancha y plana en ángulo recto con su cuerpo, la rana impide eficazmente que el agua pueda escapar; se asegura para ella y

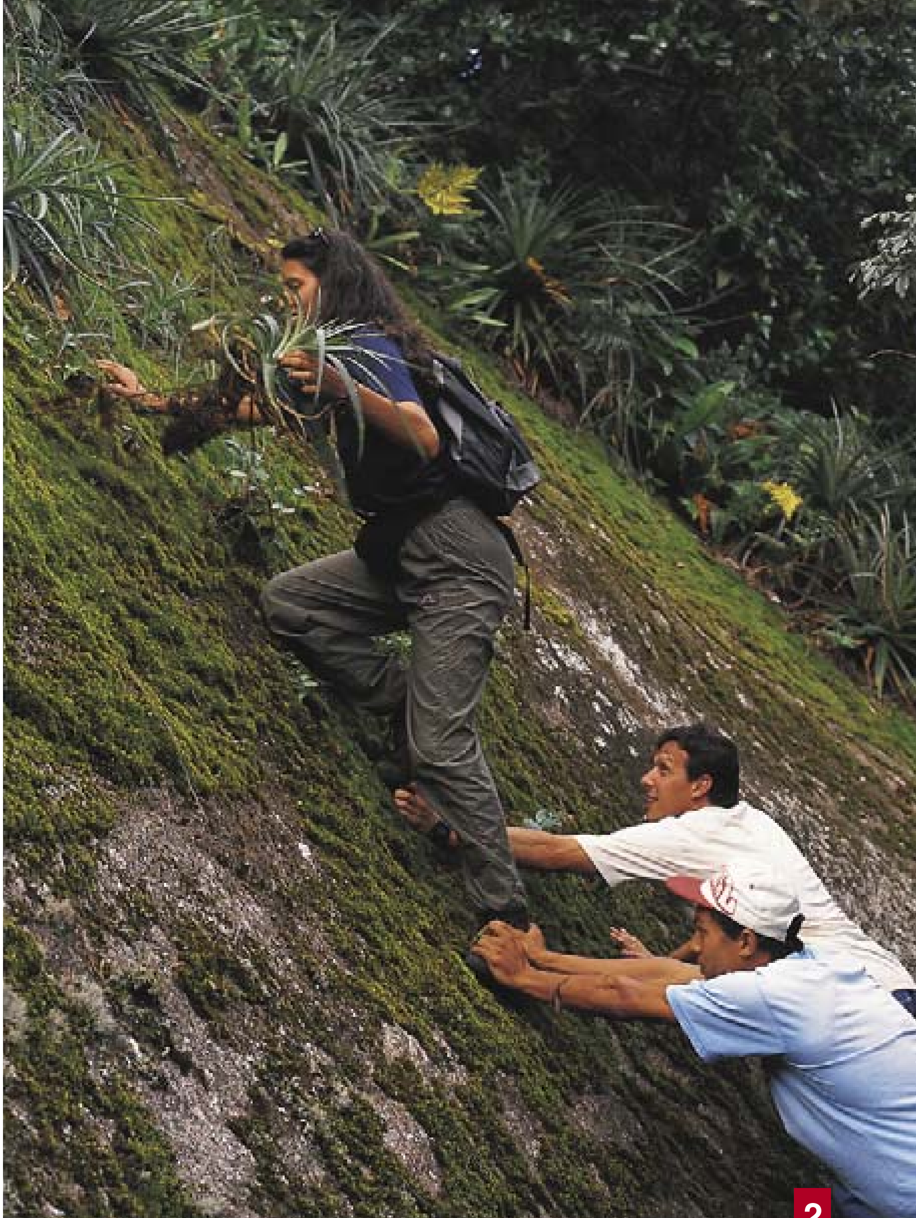
Continúa en la pág. 81

1. BROMELIA del estado de São Paulo al sur de Brasil. Se trata de *Nidularium innocentii*, un epífito como muchos de los miembros de su familia: puede crecer sobre los troncos o en las rocas, entre otros sitios. Sus raíces no necesitan suelo, sino que pueden absorber la humedad del aire.




3
4
5







2. LOS FRAGMENTOS del bosque atlántico brasileño se encuentran a menudo cerca de zonas costeras densamente pobladas. Por ejemplo, esta *Alcantarea glaziouana* (*1*) fue descubierta por encima de la ciudad de Niteroi, que queda justo al este de Río de Janeiro. Pero no siempre es tan fácil recoger las muestras. A menudo, se ha de trepar a altos árboles o escalar empinadas pendientes, como hacía Thelma Barbará cuando intentaba colectar *Dyckia encholirioides* (*2*). Sin embargo, algunas veces los brillantes colores de una bromelia en flor facilitan su localización: *Neoregelia carolinae* (*3*), *Aechmea nudicaulis* (*4*), *A. ornata* (*5*), *Bromelia plumieri* (*6*) y *Canistrum aurantiacum* (*7*).





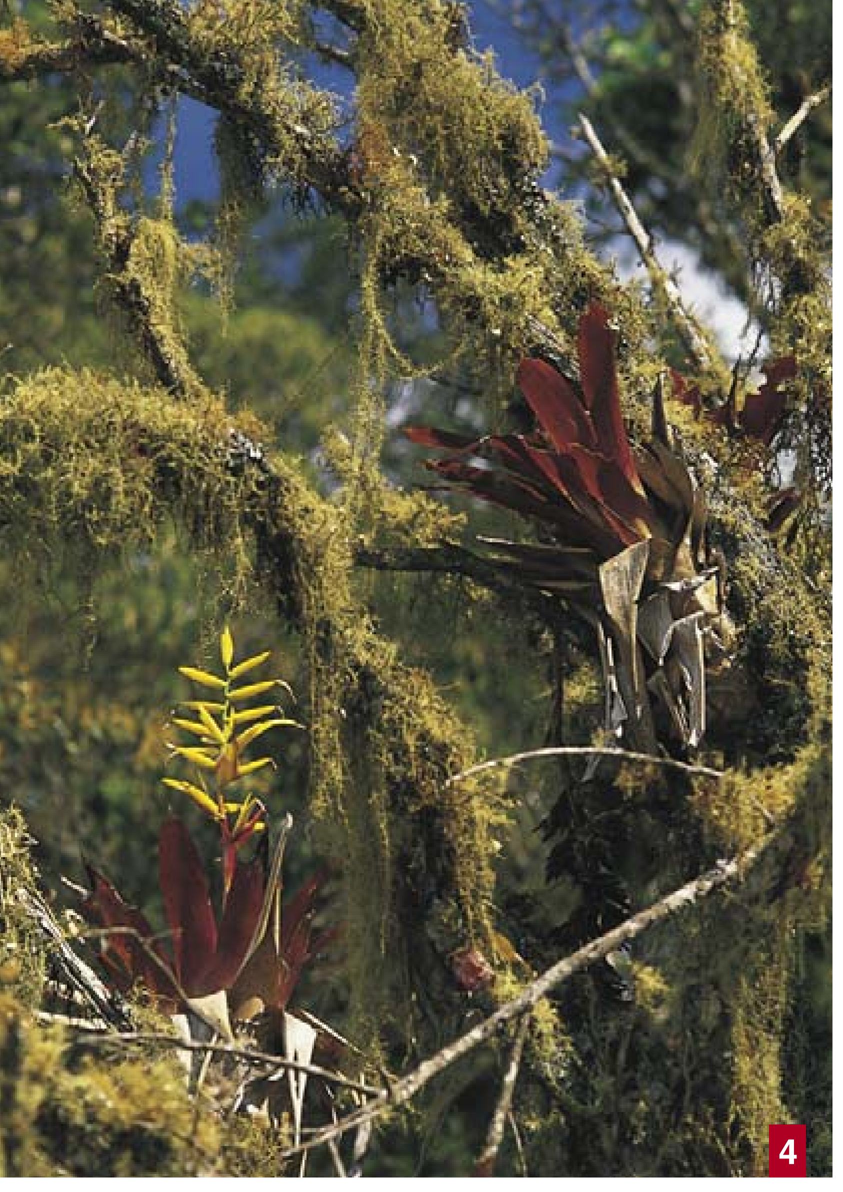






3. MUCHAS BROMELIAS, como *Neoregelia marmorata* (*1*), forman pequeños pozos de agua que dan vida a numerosas especies. Algunas han evolucionado con las propias bromelias. Se han descubierto unos 900 organismos que viven en las cisternas de esta familia de plantas, incluyendo la araña venenosa que depende de *Hohenbergia sp.* (*3*) para resguardarse. Los colibríes se cuentan entre los principales polinizadores de las bromelias; el de la fotografía visita *Vriesea glutinosa* (*5*) en busca de néctar. Las otras bromelias que aparecen aquí son *Bromelia antiacantha* (*2*), *Vriesea rodigasiana* (*4*) y *Nidularium sp.* (*6*).







Continúa de la pág. 76

para la planta una reserva de agua. Esta rana y otras de su género podrían haber desempeñado una función selectiva muy importante en la evolución del estrecho tanque tubular de algunas especies de *Billbergia*.

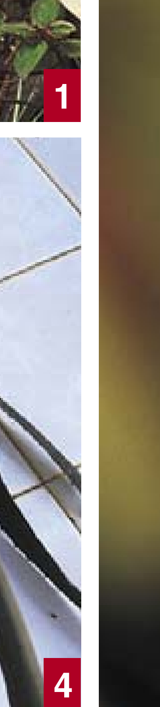
Casi todas las bromelias, terrestres y epifíticas, crecen en el Nuevo Mundo. Se encuentran entre el límite norte de Virginia en Estados Unidos y la Patagonia al sur de Argentina, y entre el este de Brasil y las islas de Juan Fernández, a 500 km de la costa de Chile. Sólo hay una especie fuera de esta área: por alguna razón desconocida, *Pitcairnia feliciana* crece en Guinea, en el Africa occidental.

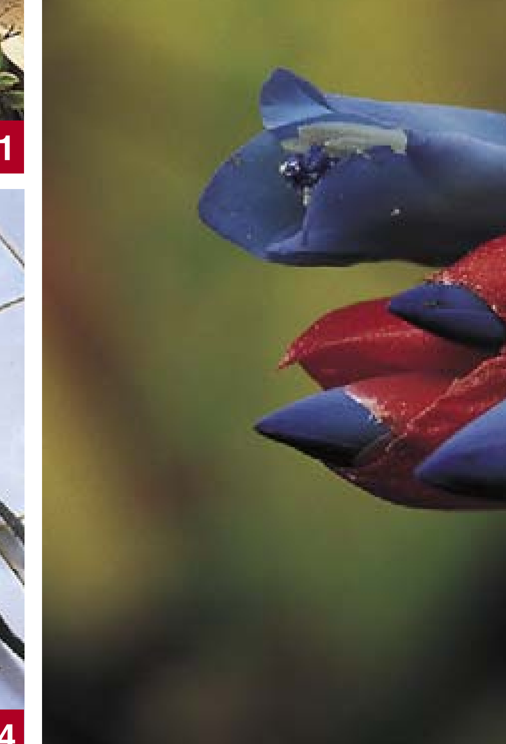
Las bromelias de la Mata Atlántica costeña no se conocen bien; muchas desaparecieron sin rastro hace siglos. Pese a todo, se consideran muy importantes por el alto nivel de endemismo: en algunos sitios, más del 53 % de los árboles, el 37 % de las especies no arbóreas y el 74 % de las bromelias se presentan sólo en determinados fragmentos del bosque. Hay quien aduce que la expresión “Mata Atlántica” induce a error porque evoca la idea de bosque uniforme cuando, en realidad, incluye bosque estacional, bosque de galería y pluviselva. En cualquier caso, dada la importancia que las bromelias revisten para otras especies, ofrecen una ventana para acercarse a esos sistemas amenazados.

Hace dos años, para catalogar y estudiar las bromelias de la Mata Atlántica me propuse con otros estudiosos visitar todos los restos del bosque costero original accesibles. A lo largo de 14 meses, emprendimos siete expediciones y recorrimos 82.400 kilómetros. De las 1056 especies y subespecies que encontramos en nuestras herborizaciones, el 66 % eran endemismos de la Mata Atlántica; ocho géneros no existen en ningún otro sitio. Descubrimos varias especies exclusivas de la cumbre de cierta montaña. Muchas otras prosperan en una superficie de sólo 20 hectáreas. La suerte nos sonrió con la flor, de tres metros de altura, de una planta que se limita a florecer una vez cada 40 años. Aún no hemos acabado de describir nuestro inventario y hasta dentro de algún tiempo no sabremos exactamente qué hemos encontrado, pero calculamos que 119 de las especies colectadas están en peligro, 188 son vulnerables y 58 se hallan al borde de la extinción.

Esta nueva colección nos ayudará a conservar las bromelias, y justo a tiempo. Los conservacionistas calculan que la presión desarrollista en la costa pronto hará que Brasil pierda otros 70.000 kilómetros cuadrados de Mata Atlántica y que del bosque original sólo quedará un 2-3 % en áreas protegidas. Ante esa perspectiva, hemos instalado los 1842 especímenes recogidos en dos invernaderos construidos al efecto en el Instituto de Investigación del Jardín Botánico de Río de Janeiro. Merced al germoplasma,


2





4. LA BROMELIA GIGANTE, *Alcantarea imperialis* (*1*), tarda 40 años en llegar a la madurez. Produce entonces una inflorescencia de tres metros de alto. Después de florecer, la planta muere, sin dejar ningún renuevo. El equipo fue tan afortunado que encontró esta planta en flor en el estado de Minas Gerais. Las demás bromelias, en su mayoría, florecen todos los años o cada pocos años y también tienen un tamaño más modesto que *A. imperialis*, incluidas *Vriesea incurvata* (*2*), *Quesnelia edmundoi* (*3*) y *Q. lateralis* (*5*). El proceso de identificación de las bromelias recogidas por el autor y su equipo es largo. Buscábamos una primera aproximación a ese grupo sobre el terreno. El espécimen en cuestión resultó ser *Aechmea castelnavii* (*4*).





esperamos poder reintroducir las especies si fuera necesario.

Al mismo tiempo, esperamos profundizar en los mecanismos biológicos de esta familia de plantas tan variopinta. Sabemos muy poco de su estrategia reproductora, pese a que los floricultores las tienen entre sus habituales plantas ornamentales, por sus rosetas de hojas y sus bellas flores de color púrpura, blanco, rojo, azul, naranja y hasta marrón. Los polinizadores principales de la Mata Atlántica son los colibríes y los murciélagos. Sin embargo, mis compañeros y yo hemos descubierto que pueden autopolinizarse. Si queremos salvar de la extinción a las bromelias (y a las especies que dependen de ellas), forzada por la pérdida de su lugar de habitación, necesitaremos ahondar en sus mecanismos reproductores.



GUSTAVO MARTINELLI y RICARDO AZOURY han colaborado en el proyecto de las bromelias desde 1997, recorriendo la Mata Atlántica para colectar y fotografiar esta rara familia de plantas. Martinelli (*arriba*) trabaja en el Instituto de Investigación del Jardín Botánico de Río de Janeiro. Se doctoró en ecología por la Universidad de Saint Andrews y volvió a su Brasil natal para estudiar el bosque atlántico. Azoury, fotógrafo de Saba Press, está especializado en temas ambientales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE POTENTIAL ROLE OF THE RIO DE JANEIRO BOTANICAL GARDEN IN CONSERVING THE ATLANTIC FOREST OF BRAZIL. G. Martinelli en *Tropical Botanic Gardens: Their Role in Conservation and Development*. Dirigido por V. H. Heywood et al. Academic Press, 1991.

REPRODUCTIVE BIOLOGY OF BROMELIACEAE OF THE ATLANTIC RAINFOREST. En *Floristic and Ecologic Aspects of Macaé de Cima Ecological Reserve*. Dirigido por H. C. Lima y R. G. Bruni. Instituto de Investigación del Jardín Botánico de Río de Janeiro, 1997.

REGIONAL FLORISTICS ON INSELBERG VEGETATION: SOUTHEAST BRAZIL. H. D. Safford y G. Martinelli en *Inselbergs: Biotic Diversity of Isolated Rock Outcrops in Tropical and Temperate Regions*. Dirigido por S. Porembski y W. Barthlott. Springer Verlag (en prensa).

Shawn Carlson

Un magnetómetro de precisión automatizado

En marzo de 1999 describía un delicioso instrumento para detectar las microfluctuaciones del campo magnético terrestre. Se trataba de una balanza de torsión de gran sensibilidad, compuesta por dos imanes de tierras raras unidos a una fibra de nailon tensa con un diminuto espejo sujeto a ella; el espejito reflejaba un haz láser sobre un muro alejado. Con el instrumento puesto a cero mediante unos imanes adicionales que contrarrestaban el campo magnético terrestre medio, bastaba una variación infinitesimal del campo terrestre para generar una rotación de los imanes de tierras raras y desviar el haz láser.

Originalmente desarrollado por Roger Baker, de Austin, ese magnetómetro de factura casera provocó todo un revuelo en la comunidad aficionada. Mas, para que recogiese datos útiles, el instrumento requería un control visual continuo, por lo que no resultaba idóneo para una actividad científica profesional. Sugería Baker, no obstante, de qué modo podría convertirse el aparato en una herramienta apta para la investigación. Me complace informar al lector de que Joseph A. Diverdi, de Fort Collins, ha resuelto brillantemente el reto.

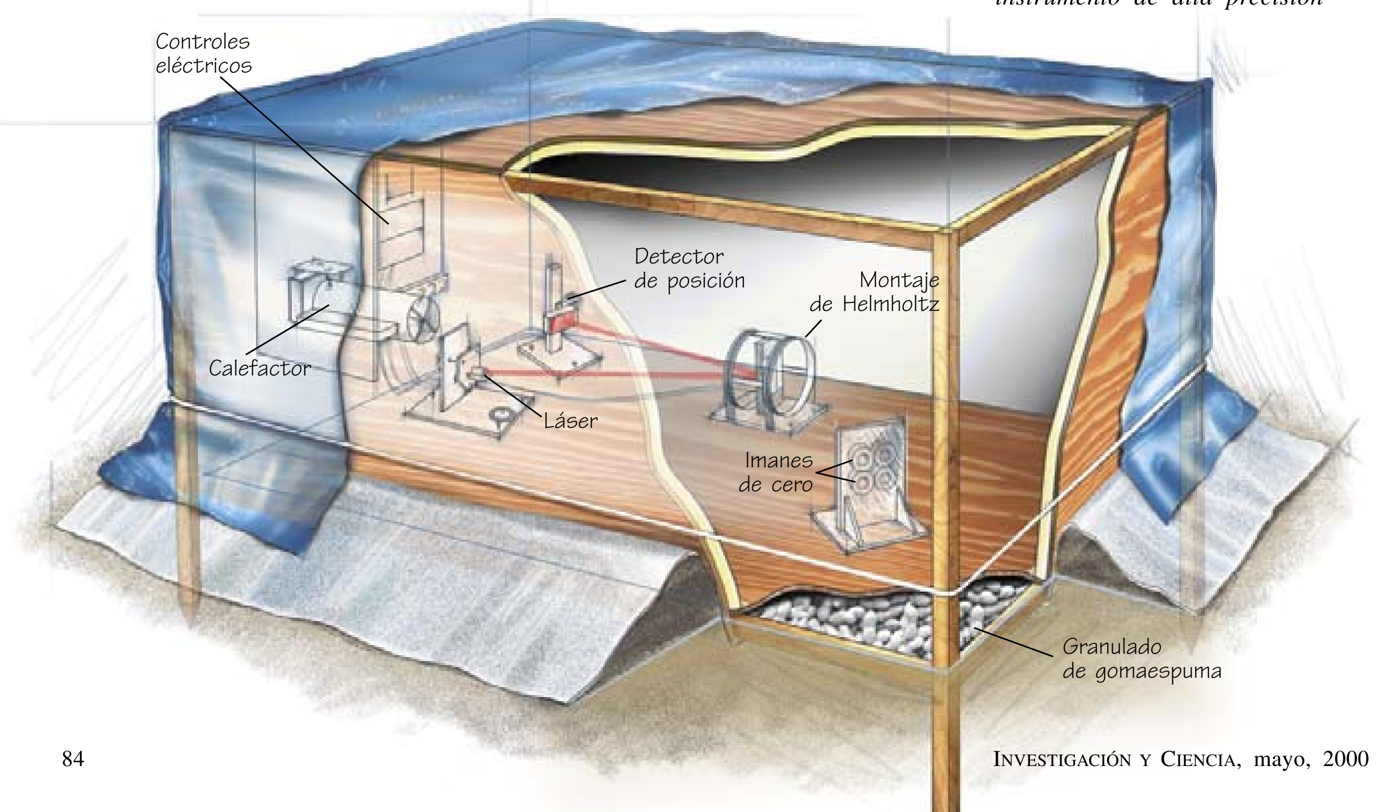
Ateniéndose a las sugerencias de Baker, Diverdi situó el magnetómetro en el centro de dos bobinas de Helmholtz, tipo de electroimán que produce un campo magnético sumamente uniforme. Diverdi diseñó, además, un detector sensible a diminutos desplazamientos de la posición del haz láser, y desarrolló un circuito de realimentación que en la bobina introduce una corriente suficiente para crear un campo contramagnético que contrarresta exactamente cualquier fluctuación exterior. De ese modo, la corriente necesaria para mantener inmóvil el espejo rastrea las variaciones del campo. Esas mediciones pueden registrarse en un ordenador personal directamente a través de un convertidor analógico-digital.

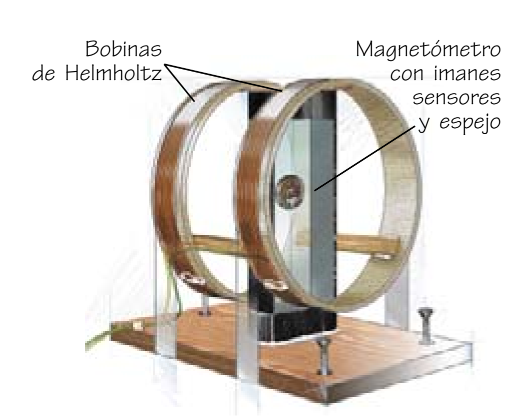
Para las bobinas de Helmholtz, Diverdi partió de dos aros de cartón rígido de unos 6,5 cm de diámetro, pero pueden emplearse aros mayores recortados de un paquete cilíndrico de harina de avena. Los aros se montan en una base de madera, paralelos entre sí y separados una distancia igual a su diámetro.

Seguidamente, en una tienda de artículos electrónicos adquiérase un carrete de alambre magnético esmaltado de la galga 30 y arróllense esmeradamente 40 vueltas de alambre sobre cada aro. Para que pase la misma corriente, sobre cada uno de éstos se arrollará un trozo de alambre continuo y ambos en el mismo sentido, horario o antihorario. Los arrollamientos se asegurarán con dosis generosas de cola caliente.

Diverdi estañosoldó dos hilos de plomo a las bobinas y aisló esos empalmes con manguitos de contracción. Estos los encoló en caliente a la base del conjunto, dejando un cierto huelgo para que no se rompieran los hilos al manejar las bobinas. Como en el centro del montaje de Helmholtz el campo magnético es constante, hay que acertar en colocar ahí los imanes de tierras raras.

1. Campo magnético terrestre. Podemos registrarlo siguiendo los minúsculos desplazamientos de un haz láser reflejado dentro de este instrumento de alta precisión





2. El montaje de Helmholtz se compone de dos bobinas de inducción que mantienen uniforme un campo magnético en torno al magnetómetro. El espejo de éste refleja el haz láser

Para detectar minúsculos cambios en la posición del haz láser, Diverdi ha ideado una ingeniosa solución, que consiste en dirigir el haz sobre una pequeña diapositiva de vidrio esmerilado con dos células fotoeléctricas de sulfuro de cadmio, situadas dos o tres centímetros detrás. El vidrio abre el haz y éste ilumina las células. Si el haz se halla exactamente centrado entre las células, sobre cada una incidirá la misma cantidad de luz; pero si el haz se desvía, aunque sea muy poco, podría incluso medirse la variación de la corriente en las células.

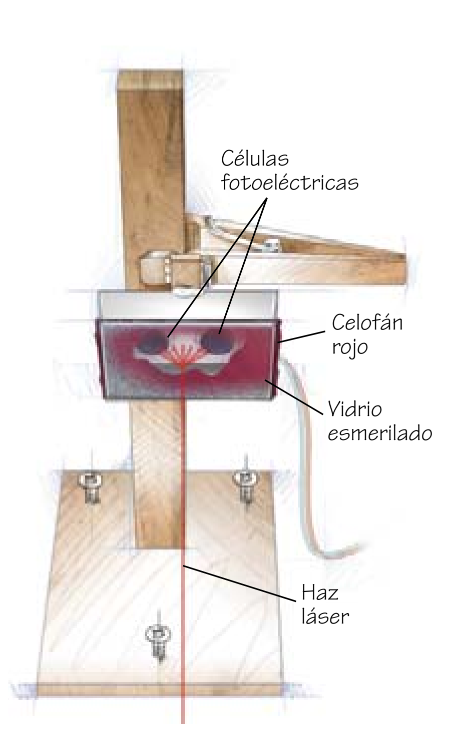
Cubriendo el vidrio con un filtro de varias capas de celofán rojo, Diverdi rebaja la sensibilidad del aparato a las luces parásitas que pudieran falsear las mediciones. El celofán permite el paso de la luz láser roja, mientras que bloquea la mayoría de las otras longitudes de onda.

Diverdi instaló el láser, el montaje de Helmholtz (magnetrómetro incluido), los imanes de cero y un detector sensor de posición sobre una robusta base de madera. Para aislar el equipo de las influencias magnéticas domésticas, construyó una carcasa de madera independiente que permitiera colocar el instrumento al aire libre. Para ello, primero fabricó un armazón mayor que la base de madera y de unos 60 cm de alto; luego fijó con clavos placas de contrachapado sobre las cuatro caras. También construyó una tapa de madera de quita y pon. Con planchas de aislante de construcción de cuatro centímetros de grueso aisló paredes y tapa; en cada esquina de las paredes fijó estacas de madera afiladas para asegurar la carcasa al suelo. Finalmente, hermetizó todas las superficies externas con un sellante acrílico transparente.

Conviene, asimismo, sellar las junturas con un aislante de gomaespuma expansiva procedente de un pulverizador. Además, para que la luz ambiental no perturbe las células fotoeléctricas, hay que hacer que la carcasa sea lo más impenetrable posible a la luz y pintar su interior de negro mate.

La mayoría de los instrumentos delicados son sensibles a los cambios térmicos; deben, pues, mantenerse en entornos controlados. Como es más fácil calentar un espacio que enfriarlo, los científicos acostumbran mantener constante una temperatura instalando un calefactor para que el recinto se halle más caliente que sus alrededores. Diverdi se hizo un estupendo calefactor casero con alambre de Nicromo y un ventilador de ordenador, pero un secador de cabellos manual probablemente haría también un buen papel.

También se construyó Diverdi su propio circuito termostático. Yo haría igual si para alimentar el calefactor se necesitaran sólo unas pocas baterías. Pero cuando hay que recurrir a una toma de corriente de pared, como con los secadores de cabello, prefiero comprar termostatos ya hechos. El controlador y el sensor termopárico hay que montarlos dentro de la carcasa, alejados de la corriente de aire caliente del calefactor. El instrumento consume menos si periódicamente a lo largo del año se ajusta el punto de reglaje para que el interior se mantenga a unos ocho grados Celsius por encima de la temperatura máxima esperada en cada estación.



3. El detector de posición emplea dos células fotoeléctricas para detectar pequeños movimientos del haz láser reflejado

Diverdi enterró parcialmente su magnetómetro excavando un cuadro de unos seis centímetros de hondo a una buena distancia de su casa. Cubrió el hoyo con una plancha de vinilo sobredimensionada y pasó las estacas de la carcasa de madera a través de unas ranuras que abrió en el plástico. Después, creó una superficie niveladora de tres puntos clavando en el suelo tres estacas más en los vértices de un triángulo equilátero inscrito en el interior de la carcasa. Seguidamente, aisló la superficie del piso con “granulado” de embalaje de gomaespuma plástica y apoyó sobre las estacas la base de madera con el láser, el montaje de Helmholtz, los imanes de cero y el detector de posición. Puesto que la base, aunque estable, no es estanca, hay que elegir un sitio con un avenamiento suficiente. Diverdi, como protección adicional frente a los elementos, cubrió con una funda de plástico impermeable toda la caja de madera.

Si se desea observar la temperatura interior del instrumento con un ordenador personal, puede tomarse la señal del termopar desde la entrada al controlador. Pero antes hay que intercalar en cada hilo un amplificador operacional de transistor de efecto de campo tal como el LF411CN, cuya corriente de polarización es baja.

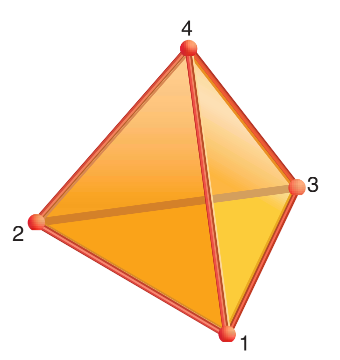
Ahora bien, los termopares están infestados de fastidiosas sutilezas; por eso, se recomienda a los principiantes que empleen un convertidor analógico-digital equipado con lo necesario para interpretar las señales del termopar.

Con este dispositivo, Diverdi ha conseguido unos resultados impresionantes. Si su ejemplo impulsa a alguien a seguir sus pasos, por favor, que comparta sus experiencias a través de la página de la Red de nuestra sociedad de aficionados.

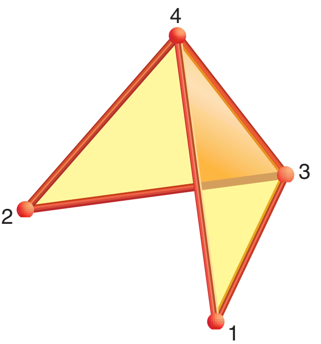
Para más información, examínese el sitio Web de la Society for Amateur Scientists en earth.thesphere.com/sas/WebX.cgi. Puede también escribirse a la sociedad a 4735 Clairemont Square PMB 179, San Diego, CA92117, o llamar al 619-239.88.07.

Ian Stewart

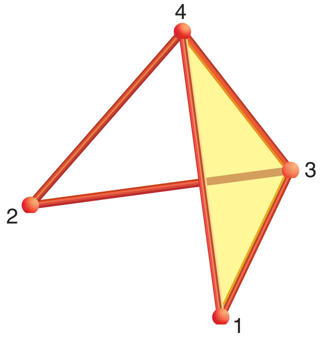
Una estrategia para subconjuntos



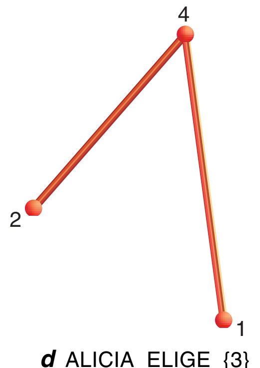
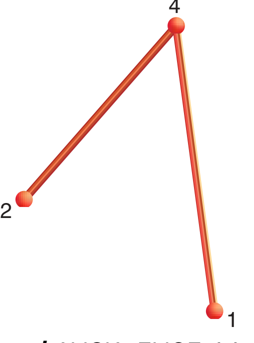
a POSICION DE PARTIDA



b ALICIA ELIGE {1,2}



c BENITO TOMA {2,3,4}

d ALICIA ELIGE {3}

La tradición de explicar las matemáticas mediante juegos y acertijos se remonta a los antiguos babilonios, que ya inscribieron rompecabezas aritméticos en sus tabletas de arcilla. En tiempos recientes, sin embargo, los rápidos progresos en matemáticas han hecho surgir toda una pléyade de juegos enteramente nuevos. David Gale ha inventado uno de estos divertimentos, descrito en *Games of No Chance*, compilado por R. J. Nowakowski. El juego combina ideas tomadas de la teoría de conjuntos y de la topología.

Los conjuntos son colecciones de entes de cierta clase especificada, objetos que reciben el nombre de elementos o miembros del conjunto. Si un conjunto consta de un número finito de elementos podemos definirlo escribiendo entre llaves la lista de sus elementos. Por ejemplo, {2, 3, 5, 7} es el conjunto de todos los números primos menores que 10. Se dice que un conjunto X es subconjunto o parte de un conjunto Y si cada elemento de X es elemento de Y: el conjunto {3, 5, 7} de todos los números primos impares menores que 10 es un subconjunto de {2, 3, 5, 7}. Cada conjunto es subconjunto de sí mismo; un subconjunto de X es "propio" si es distinto de X. Los conjuntos pueden constar de un solo elemento: {2}, por ejemplo, es el conjunto de todos los números primos pares.

El juego de Gale se llama Eliminar Subconjuntos. Se parte de un conjunto finito S, que supondremos que es el conjunto {1, 2, ..., n} de los números enteros desde 1 hasta n. Cada jugador, en su turno, selecciona un subconjunto propio y no vacío de S, con una condición: ningún subconjunto que haya sido tomado anteriormente puede ser parte del nuevo subconjunto. Una forma práctica de jugar consiste en trazar una serie de columnas en una hoja de papel, encabezadas con los números 1, 2, ..., n y marcar una línea de cruces en las columnas correspondientes al subconjunto elegido. Una jugada nueva, legal, no puede incluir todas las cruces de ninguna de las jugadas anteriores.

Sean Alicia y Benito los jugadores, y sea Alicia la primera en jugar. En el caso n = 1 no hay movimientos lícitos. Cuando n = 2 se tiene S = {1, 2}. Las únicas jugadas de apertura de que dispone Alicia son {1} y {2}. Cualquiera que sea la elegida, Benito puede elegir el otro subconjunto. Alicia queda entonces sin jugadas lícitas; Benito gana.

El juego es más interesante cuando n = 3 y S = {1, 2, 3}. Supongamos que Alicia toma inicialmente un subconjunto de dos elementos, el {1, 2}. Entonces Benito puede elegir el subconjunto complementario —todo lo no elegido por Alicia—, que es {3}. Alicia no puede ahora tomar un subconjunto que contenga al 3, y ha de optar por un subconjunto de {1, 2}. A partir de ese momento el juego se desarrolla como si el conjunto de partida hubiera sido {1, 2}, así que Benito vuelve a ganar. Alicia, sin embargo, dispone de otra clase de apertura: tomar un subconjunto de un solo elemento, el {3}, por ejemplo. Si Benito eligiera ahora el subconjunto complementario, {1, 2}, el juego continuaría como si el conjunto de partida hubiera sido {1, 2}. Benito vuelve a ganar. Dado que la apertura de Alicia ha de ser, ora un subconjunto de un elemento, ora un subconjunto de dos, Benito dispone en este caso de una estrategia de victoria: tomar el conjunto complementario del elegido por Alicia. ¿Dará esta estrategia la victoria a Benito cuando n sea mayor que 3?

Pasemos ahora a la topología. Con el fin de crear una representación geométrica del juego de eliminación de subconjuntos nos serviremos de una de las técnicas básicas de la topología, que consiste en la triangulación de las figuras, es decir, su descomposición en triángulos adosados por sus lados.

El juego de eliminación de subconjuntos admite representación topológica. La posición de partida es un tetraedro (a). *Alicia y Benito van por turno seleccionando subconjuntos; se van eliminando las piezas del tetraedro, hasta no dejar nada* (de b a g)

2

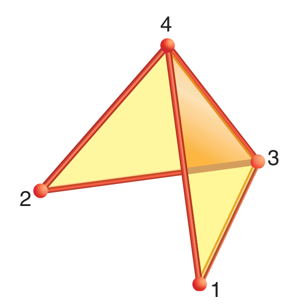
1

1

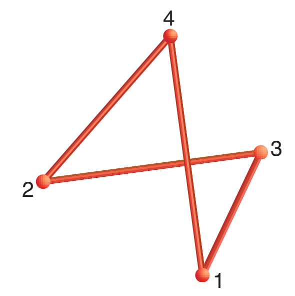
e BENITO TOMA {4}

f ALICIA ELIGE {2}

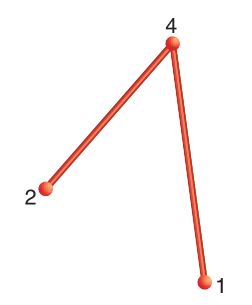
g BENITO TOMA {1} Y GANA!



a ALICIA ELIGE {1,2}



b BENITO TOMA {3,4}



c ALICIA ELIGE {3}

La estrategia de complementación falla en esta versión de Eliminación de Subconjuntos, porque Benito no puede tomar el subconjunto complementario de la segunda jugada de Alicia (c)

Estrictamente hablando, esta descripción sólo es aplicable a las superficies, pero el mismo método es válido para figuras de dimensión superior, si sustituimos los triángulos por símplices. Un símplice (o símplex) tridimensional es un tetraedro, cuyos vértices rotularemos 1, 2, 3, 4. El símplice tridimensional tiene cuatro caras, seis aristas y cuatro vértices. Sus caras son triángulos (llamados 2-símplices), las aristas son segmentos rectilíneos (1-símplice) y los vértices son puntos (0-símplice). Además, estas porciones del 3-símplice se corresponden con los subconjuntos de {1, 2, 3, 4}. El tetraedro se corresponde con la totalidad del conjunto {1, 2, 3, 4}. Las caras, con los cuatro subconjuntos de tres elementos {1, 2, 3}, {1, 2, 4}, {1, 3, 4} y {2, 3, 4}. Los lados se corresponden con los seis subconjuntos de dos elementos, a saber, {1, 2}, {1, 3}, {1, 4}, {2, 3}, {2, 4} y {3, 4}. Y los vértices equivalen a subconjuntos de un elemento: {1}, {2}, {3} y {4}.

Cualquier $(n - 1)$-símplice puede ser identificado con el conjunto {1, 2, ..., n}; sus diversas partes de menor dimensión pueden ser identificadas con subconjuntos propios. El juego de eliminación de subconjuntos puede ser rebautizado como “Eliminación de Símplices”. Los jugadores empiezan con un símplice dado. Una jugada consiste en seleccionar un subsímplice propio de dimensión cualquiera y en suprimir su interior, así como los interiores de todos los subsímplices de dimensión mayor que lo contengan. Pero en la jugada *no* se elimina la frontera del subsímplice elegido; por ejemplo, los tres lados de una cara triangular o los dos puntos extremos de una arista.

Podemos servirnos de esta representación para analizar el juego de eliminación de símplices correspondiente a un 3-símplice, que corresponde al de eliminación de subconjuntos con $n = 4$. La posición inicial es un 3-símplice completo, es decir, un tetraedro. En la figura 1 se expone una serie de jugadas lícitas. Un examen sistemático de todas las secuencias de este tipo hace ver que Benito puede ganar siempre en el juego con $n = 4$. Otro tanto vale para $n = 5$ y $n = 6$. Gale ha conjeturado que Benito dispone de una estrategia de victoria para todo valor de n. Que yo sepa, tal conjetura no ha sido todavía demostrada ni refutada.

¿Cuál es, pues, la estrategia de victoria de Benito en los casos $n = 4$, 5, 6 y posteriores? ¿Deberá elegir siempre el complemento de la jugada de Alicia, como en la estrategia para $n = 3$? En el caso $n = 4$, Alicia puede comenzar con un vértice, una arista o una cara triangular. Si opta por un vértice y Benito toma el conjunto complementario, el juego se reduce al caso $n = 3$, y Benito gana. Si elige una cara triangular y Benito toma el vértice complementario, el juego vuelve a reducirse a la versión más sencilla. Ahora bien, ¿qué sucede si Alicia toma una arista —la correspondiente a {1, 2}— y Benito toma la complementaria, que sería la de {3, 4}?

La figura 2 permite ver lo que sucede a continuación. Si Alicia toma {3}, Benito no puede tomar el subconjunto complementario {1, 2, 4}, por no ser jugada lícita (en el símplice asociado, la cara triangular correspondiente se ha eliminado ya). La estrategia de complementación falla, pues, en este caso. Algunos han conjeturado que, para todo n, la respuesta correcta de Benito a cualquier jugada de apertura de Alicia consiste en tomar en su primera jugada el conjunto complementario. Mas, a partir de ahí puede verse obligado a desviarse de la estrategia de complementación.

¿Y qué le pasa a la pobre Alicia? ¿Es cierto que Benito puede siempre vencerla en todas las versiones de Eliminación de Subconjuntos? Es muy posible que las búsquedas por ordenador refrenden o refuten esta conjetura en los casos $n = 7$, 8 u otros valores pequeños. Pero en el caso de valores de n grandes, la demostración exigirá un nuevo enfoque.

Acuse de recibo

Ron Menéndez ha señalado otra interesante propiedad de la curva de Sierpinski (*al pie*), de la que me ocupé en octubre de 1999. Tomemos un triángulo equilátero de vértices A, B y C y tomemos un punto X cualquiera del plano del triángulo. Seleccionemos un vértice al azar, por ejemplo, lanzando un dado y haciendo corresponder el 1 o el 2 al vértice A, el 3 o el 4 al vértice B, y el 5 o el 6 al C. Hallemos el punto medio del segmento que une X con el vértice elegido: ésta será la nueva posición de X. Repitamos ahora el procedimiento, tomando siempre un vértice al azar y trasladando a X hasta el punto medio entre su posición precedente y el nuevo vértice. Aparte de unos cuantos puntos iniciales, en los que el paseo aleatorio “se va estabilizando”, ¡la nube de puntos resultantes es una curva de Sierpinski!

Este sorprendente resultado es explicado por la teoría de fractales sibisemejantes de Michael Barnsley. La curva de Sierpinski tiene tres vértices, que también podemos rotular A, B y C. Está formada a partir de tres copias menores de sí misma, cada una de las cuales tiene lados de longitud mitad que la inicial. Si trazamos un segmento desde cualquier punto de la curva hasta A, B o C, el punto medio del segmento también se encontrará en la curva. Esta propiedad se corresponde con las reglas del paseo aleatorio de Menéndez. Barnsley ha demostrado que todo paseo de esta naturaleza “converge” hacia la curva de Sierpinski.

—*I.S.*

James Burke

Guau, Guau

Esta mañana, el editor de mi próximo libro me preguntó por los ejemplares de cortesía, previos a su difusión. Me encontraba ya preparando una larga lista, cuando recordé con vergüenza que Charles Darwin sólo envió tres. Uno de ellos lo remitió al biólogo (experto en medusas) Thomas Huxley. Tanto le gustó, que se ganaría el nombre de "cancerbero de Darwin", al defender con éxito la teoría evolucionista en un famoso debate público. Le remitió otro ejemplar del *Origen* a Charles Lyell, que había proporcionado a Darwin buena parte de la base geológica sobre la suficiente antigüedad de la Tierra para haber acogido el lento proceso de la evolución.

El padre de Lyell, que también se llamaba Charles, era el padrino de Dante Gabriel Rossetti, quien en 1848 auspició la creación de un grupo de artistas sensibles con tendencia a la hipocondría y al arte "pícaro". La Edad Media era su debilidad y se autodenominaron "la Hermandad Prerrafaelista". Produjeron en la época victoriana versiones del siglo XIII al estilo Disney, bastante aceptables a quien interesen los desvaídos. La mujer del pobre Rossetti, que nunca había sido fuerte, se administró una sobredosis letal de láudano en 1862. Cuando diez años más tarde éste intentó la misma jugada, tuvo la suerte de que el Dr. John Marshall anduviera cerca.



Marshall, un fiel seguidor de la cofradía, daba lecciones de anatomía humana a los futuros artistas. Experto en varices y en crujías circulares, Marshall era íntimo de un tipo importante, Robert Liston, el escalpelo más rápido de Londres. En 1846 se convirtió en el primero en experimentar con el éter (óxido nitroso) fuera de Estados Unidos. Y lo hizo para anestesiar un paciente al que había que amputar una pierna. El problema radicaba en que la cantidad de éter requerida para relajar los músculos no era mucho menor que la que podía inducir una parálisis fatal. La intervención de Liston seguía el camino abierto por W. T. G. Morton dos meses antes en Boston. En el Hospital General de Massachusetts, Morton administró el nuevo anestésico por vez primera para extirpar un tumor cervical.

En su época de estudiante de Harvard, Morton había aprendido química con Charles T. Jackson, todo un carácter (que terminaría por perder la razón). Acusó a Morton de haberle robado la idea de la anestesia quirúrgica e inició un infructuoso litigio que duró varios años. Jackson también sostuvo haber inventado el algodón pólvora antes que Christian Schönbein. Tampoco se libraría Samuel Morse, a quien pretendía haber revelado el secreto del telégrafo en 1832 en el barco que los llevaba de Europa de regreso a los EE.UU. Por aquel entonces, Morse en realidad aún esperaba hacer carrera como pintor y confiaba que le encargaran los murales de la *Rotunda* de Capitol Hill que faltaban. Afortunadamente para el futuro de las telecomunicaciones, no lo consiguió.

John Trumbull, que había completado los cuatro primeros murales de la *Rotunda*, era un artista de segundo orden. Sólo veía bien con un ojo, de forma que los esbozos iniciales a pequeña escala eran mucho mejores que los que terminaban por decorar las paredes. Había sido ayudante de campo de George Washington durante la Guerra de Independencia (adivinen por qué le encargaron el trabajo de la *Rotunda*). Trumbull estuvo diez años en Londres vigilando la ejecución del tratado Jay, firmado para evitar otra guerra entre Gran Bretaña y los Estados Unidos y reputado en los EE.UU. una traición de los probritánicos.

Fuera eso u otra cosa, todo el asunto arruinó las aspiraciones presidenciales de uno de los negociadores del tratado por parte americana y superior de Trumbull en Londres, John Jay. Doce años antes, Jay ya había sellado otro tratado de paz con los británicos tras la guerra de secesión. En esa ocasión, Jay fue el segundo de Ben Franklin, para el que a su vez era la tercera (en las dos primeras representó a varias colonias y en la última a los nuevos Estados Unidos de América).

A nadie ha de extrañar que desde los comienzos de su carrera diplomática, Franklin reclutara para la causa a cuanto afín a los intereses norteamericanos se le cruzara en el camino. Fue éste el caso de cierto panfletista inglés en paro, dos veces viudo, a quien convenció fácilmente de que en el oeste no le podía ir aún peor. Una vez en Filadelfia, Tom Paine ganó fama con una composi-

ción que Washington convirtió en arenga ante las tropas concentradas en Valley Forge ("Estos son tiempos que ponen a prueba el espíritu de los hombres...", etc.). De regreso a Inglaterra, los acontecimientos de la Revolución Francesa inspiraron la obra magna de Paine, *Los Derechos del Hombre*. El libro sentó mal en Gran Bretaña y se le condenó reo de traición. Paine escapó a Francia para alimentar la oposición a todas las formas de injusticia monárquica. En 1802 Paine regresó a los EE.UU. para descubrir que había sido olvidado. En 1809, murió.

No hay descanso para el infame, dirían algunos, cuando una década después de su entierro, un admirador exhumó sus restos para trasladarlos al Viejo Mundo y éstos se perdieron nada más llegar a Liverpool. Nos referimos a un admirador ya conocido en esta página, William Cobbett, americanista, reformador social y espina clavada para la clase dirigente británica. Además de su muy recomendable diario sobre sus experiencias entre los oprimidos campesinos británicos, privados de derechos y abandonados a la pobreza (*Rural Rides*), Cobbett también escribió una obra sobre (el admirable personaje de) Richard Brinsley Sheridan, dramaturgo y desde 1776 gerente del teatro Drury Lane de Londres. En 1777 estrenó allí con éxito clamoroso *The School for Scandal*. El Sheridan político se tomó muy en serio el debate parlamentario (en cierta ocasión peroró cuatro horas seguidas), tanto que, ni siquiera abandonó la Cámara de los Comunes para ocuparse de su teatro en llamas.

La cantidad de éter requerida para relajar los músculos no era mucho menor que la que podía inducir una parálisis fatal.

Colega suyo en el palacio de Westminster (amén de compañero de juego en las tabernas de Londres) fue uno de esos hombres casi demasiado buenos para ser reales, un ídolo sin pies de barro. William Wilberforce, por todos admirado, muy bondadoso y agradablemente leído filántropo que llevó en solitario la legislación antiesclavista del parlamento. Es casi un alivio conocer que su hijo famoso (obispo anglicano de Oxford andando el tiempo) disfrutaba con el apodo de Sam "el jabonoso". Y ello gracias a su oratoria escurridiza y a su habilidad de mirar a dos sitios a la vez sin tomar partido, en prácticamente cualquier causa. El obispo Wilberforce ha pasado a la historia por doble motivo: su éxito con la reforma de la Iglesia de Inglaterra y su fracaso, no obstante su talento matemático reconocido en Oxford, en cierto debate científico. Se desarrolló en Oxford en 1860.

En la lid, peleada en 1860, salió vencedor el cancerbero de Darwin. Huxley remató el asunto con las famosas palabras: "Si ... se me planteara la elección de tener por abuelo a un triste mono o a un hombre generosamente dotado por la naturaleza y en posesión de grandes medios de influencia, y que a pesar de todo se sirviera de estas facultades y esta influencia para ridiculizar una disputa científica, proclamo sin dudarlo mi preferencia por el mono."

La teoría cuántica

Más allá de la intuición

QUANTUM GENERATIONS: A HISTORY OF PHYSICS IN THE TWENTIETH CENTURY, por Helge Kragh. Princeton University Press; Princeton, 1999. **QUANTUM PHILOSOPHY. UNDERSTANDING AND INTERPRETING CONTEMPORARY SCIENCE**, por Roland Omnès. Princeton University Press; Princeton, 1999. **QUANTUM DIALOGUE. THE MAKING OF A REVOLUTION**, por Mara Beller. The University of Chicago Press; Chicago, 1999.

THE ODD QUANTUM, por Sam Treiman. Princeton University Press. Princeton, 1999. **CP VIOLATION**, por I.I. Bigi y A.I. Sanda. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

THE DAPPLED WORLD. A STUDY OF THE BOUNDARIES OF SCIENCE, por Nancy Cartwright. Cambridge University Press; Cambridge, 1999. **FROM PHYSICS TO PHILOSOPHY**. Dirigido por Jeremy Butterfield y Constantine Pagonis. Cambridge University Press; Cambridge, 1999. **A PHILOSOPHER'S UNDERSTANDING OF QUANTUM MECHANICS. POSSIBILITIES OF A MODAL INTERPRETATION**, por Pieter Vermaas. Cambridge University Press; Cambridge, 1999.

Por su carácter no local, procesos de medición controvertidos, curiosas predicciones y paradojas contraintuitivas, la mecánica cuántica se resiste a entrar en el acervo cultural común. Y eso que lleva cien años de historia fecunda. Ayer mismo, a finales de marzo para ser exactos, la Sociedad Americana de Física aplaudía que en Delft y en Stony Brook se demostrara por vía experimental la metamorfosis del famoso gato de Erwin Schrödinger en "calamar", es decir, en finos anillos superconductores que portan, a la vez, corrientes en sentidos opuestos.

Del pasado de la teoría y sus relevos a lo largo de la centuria nos habla Helge Kragh en *Quantum Generations*, compendio de los hitos de la física reciente, que sobresale por algo que no recogen las introducciones históricas de los manuales: la deuda oculta de la teoría cuántica y de la relatividad. (El libro se estructura en tres partes cronológicas; a saber, fundación de 1890 a 1918, desarrollo de 1918 y 1945, y expansión hasta nuestros días.)

Se sigue todavía leyendo que la física de finales del siglo XIX era una ciencia conclusa, labrada sobre una visión determinista y mecanicista del mundo inaugurada por Newton. Se añade a renglón seguido que no estaban los físicos preparados para la tromba de descubrimientos que se avecinaba: rayos X, electrón, radiactividad, cuanto de acción de Planck y teoría einsteiniana de la relatividad. Pero en la ciencia, los hallazgos no suelen ser acontecimientos, sino procesos.

Los temblores previos al terremoto venían de atrás. El electromagnetismo ponía en cuestión la mecánica laplaciana. Con la teoría de campos, cambió el mecanismo de propagación de las fuerzas, si bien Maxwell y su escuela continuaban buscando un medio persistente, un éter universal, que lo bañaba todo, a través del cual las fuerzas se propagaban a una velocidad finita. El propio Maxwell consideraba la posibilidad de explicar la fuerza de la gravitación en el marco de la teoría electromagnética, pero abandonó el empeño tras caer en la cuenta de que tendría que adscribir una enorme energía interna al éter.

La corriente hidrodinámica, por su parte, defendía la teoría atómica vorticial, sugerida por William Thomson. De acuerdo con la misma, los átomos eran modos vorticiales del movimiento de un fluido perfecto, primitivo, identificado con el éter. Afín a la misma tesis era la teoría de los "chorros de éter", de Karl Pearson. En su opinión, el átomo último era un punto a partir del cual fluía éter en todas direcciones del espacio. Pearson concedía a su doctrina capacidad para explicar la gravitación, el electromagnetismo y los fenómenos químicos. No sólo admitía fuentes, sino también sumideros de éter, es decir, una suerte de materia negativa.

Arthur Schuster especuló sobre la posibilidad de que hubiera sistemas estelares enteros de antimateria. Introdujo en 1898 los términos "antimateria" y "antiátomos", para sugerir que la materia y la antimateria colisionantes se aniquilarían entre sí.

En la versión de Pearson de la antimateria, el éter expulsado desaparecía de nuestro mundo en un sumidero. ¿De dónde procedía el éter? Según escribiera en 1892, no procedía *ex nihilo*, sino que derivaría de una cuarta dimensión, a la que volvería. La verdad es que las ideas de los hiperespacios y su posible significación en física no eran ninguna novedad en los noventa. En 1870, William Kingdon Clifford se basó en la geometría curva de Riemann para proponer que el movimiento de la materia y el éter era una manifestación de una variación de la curvatura del espacio.

En ese contexto hemos de entender la fecha asignada al nacimiento de la física del siglo XX, el 8 de noviembre de 1895, en que Wilhelm Röntgen observó los rayos X, aunque el significado de los mismos no se entendió hasta semanas después. Otros retrasan el punto de arranque hasta el primer informe de Max Planck sobre teoría cuántica el 14 de diciembre de 1900. Pero no está nada claro que Planck supiera de entrada que había cuantizado la energía de los átomos; ese paso lo daría, años después, Albert Einstein. Y antes que éste publicara en 1905 su escrito seminal sobre la relatividad, clamaba Henri Poincaré por una nueva dinámica, caracterizada "por la regla de que ninguna velocidad pueda exceder la velocidad de la luz".

Conjúguese el relato de Kragh con la nítida secuencia de ideas de esos años fundamentales expuesta en *Quantum Philosophy*. Hacia 1901, se había establecido que los rayos eran complejos, que constaban de tres especies de diferente penetrabilidad. A los rayos β, que se desviaban en un campo magnético, se les identificó pronto con los electrones. Desde 1912 quedó claro que los rayos γ eran ondas electromagnéticas semejantes a los rayos X. Pero la naturaleza de los rayos α seguía envuelta en el misterio. Los primeros experimentos mostraron que no se desviaban por campos magnéticos o eléctricos; debían ser neutros, pues.

En 1911, Ernest Rutherford trabajaba en experimentos en que las

partículas α producidas por la desintegración del radio atravesaban una fina lámina de metal. Las partículas se desviaban ligeramente de su trayectoria inicial: estaban dotadas de carga. El efecto podría deberse a fuerzas eléctricas, pero los electrones eran demasiado ligeros para dar cuenta de tales desviaciones. Rutherford analizó los datos y postuló la presencia, en el centro del átomo, de un "núcleo" dotado de carga positiva. Este fue el primer modelo satisfactorio del átomo: un núcleo rodeado por electrones. El núcleo ejercía una fuerza eléctrica de atracción sobre los electrones, similar en su forma, si no en magnitud, a la gravitación. Era ese retrato del átomo, vacío en su mayor parte y con electrones en órbita alrededor del núcleo, la situación ideal para aplicar los métodos de la mecánica.

Pronto empezaron los problemas. Un electrón que gravite en torno al núcleo debe acelerarse. Ahora bien, una partícula en aceleración y dotada de carga emite ondas electromagnéticas. Así debía ocurrir con el electrón, sometido a una aceleración excepcional en el interior del átomo. Un sencillo cálculo conducía directo al desastre: en una fracción de segundo, el electrón debía radiar a una velocidad celerísima y viajar hacia el núcleo para compensar su pérdida de energía. Por tanto, el electrón tenía que desplomarse casi de inmediato. Tenía forzosamente que haber algún error, a menos que las propias leyes de la física dejaran de ser válidas a escala atómica.

No se trataba de una hipótesis improbable, puesto que algo similar había ocurrido un decenio antes con respecto al problema del espectro de radiación del cuerpo negro. En este caso se creyó poder solucionar la aporía mediante las leyes de la termodinámica. Pero esa línea de razonamiento llevaba al absurdo: un pedazo de carbón debía emitir una luz de intensidad infinita. En 1900, Planck había encontrado una argucia para evitar la dificultad. Había supuesto que los átomos de carbón no radiaban continuamente, según cabía esperar de acuerdo con la electrodinámica, sino que emitían pulsos o "cuantos" de radiación, siendo la energía emitida en cada pulso igual al producto de la frecuencia por un número, la ahora llamada constante de Planck.

De incorporar la constante de Planck en el átomo de Rutherford se encargó Niels Bohr, quien propuso en 1913 una nueva dinámica. Estudió el átomo de hidrógeno en razón de su simplicidad. Para evitar el desplome del electrón, Bohr exigía que el electrón describiera determinadas órbitas y no radiara mientras cursara a lo largo de la menor de las elipses trazadas. Cuando el electrón irradia, emite un pulso, un cuanto de energía. Cada trayectoria elíptica permisible debía corresponder con una energía definida, cuya expresión recogía la masa del electrón, su carga y la constante de Planck, junto con un entero, el número cuántico. Bohr postulaba también que, para irradiar, el electrón tenía que saltar de una elipse a otra de nivel menor de energía. Predijo entonces las frecuencias de la radiación que el átomo de hidrógeno puede espontáneamente emitir. Estas frecuencias formaban el espectro de radiación atómica, ya observado y medido mucho antes del tiempo de Bohr. El acuerdo entre modelo y mediciones era óptimo.



Escultura en aluminio de Albert Einstein y Niels Bohr realizada por B.C. Lemport

La mecánica cuántica va asociada a la llamada interpretación de Copenhague, objeto de análisis y diatriba, en pareja proporción, de *Quantum Dialogue*, de Mara Beller. Esta profesora de la Universidad Hebrea de Jerusalén acomete un análisis "dialógico" de los intercambios de puntos de vista, cartas, conferencias y otros escritos de los actores, principales y secundarios, "villanos" (Bohr y Heisenberg) y "héroes" (Einstein y Schrödinger). Divide la obra en dos partes, consagrada la primera a la creación dialógica de la interpretación de Copenhague de la teoría cuántica, y a la explicación de la misma la segunda, su narración nomológica.

No cabe negarle a la autora ni el dominio de la cuestión ni la libertad con que aborda los años fundadores de 1925 a 1928. Pero ese desparpajo necesario lo extiende a juicios sobre la supuesta falta de honradez intelectual y motivaciones extracientíficas que no se prueban con solidez. Siendo una de las diversas aproximaciones en liza, expone, esta versión de la teoría cuántica triunfó en buena medida debido a la habilidad retórica de Bohr y sus colegas.

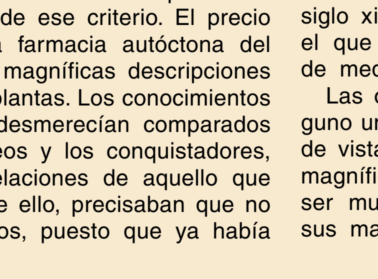
Parte de la explicación recibida, contra la que se rebela, del desarrollo

Farmacia natural

GESCHICHTE DER PHARMAZIE, por Rudolf Schmitz. Govi-Verlag; Eschborn, 1998.

La historia de la farmacia es la historia del ingenio. Para curarse, el enfermo introduce en su cuerpo o pone en contacto con su piel todo tipo de productos y sustancias. Hacer el inventario de los materiales utilizados por la farmacia equivaldría a catalogar cuanto existe. Una parte de estos materiales forma parte del discurso científico y, como tal, es motivo de estudio por parte de los historiadores de la farmacia como Schmitz (1918-1992), para quienes la mayor parte del iceberg permanece sumergida. El desarrollo económico alcanzado durante el siglo xx, con la implantación y expansión de los sistemas de seguridad social, ha extendido a la mayoría de la población lo que siempre fue minoritario: el medicamento prescrito por el médico y elaborado por un farmacéutico.

Es ésta una de las primeras objeciones que podría hacérsele al texto de Rudolf Schmitz: el de haber prestado poca atención al componente popular y creencial de los medicamentos, actitud que se refleja en el mínimo desarrollo del apartado dedicado a la farmacia simbólica y animista, aquella a la que ha recurrido la mayoría de los enfermos. La omisión de toda referencia a la farmacia precolombina sólo pude entenderse desde ese criterio. El precio a pagar es la ausencia de la farmacia autóctona del continente americano, con sus magníficas descripciones botánicas y terapéuticas de las plantas. Los conocimientos terapéuticos de los indios no desmerecían comparados con los de los médicos europeos y los conquistadores, el enviar a la metrópoli las relaciones de aquello que más necesitaban por carecer de ello, precisaban que no era preciso el envío de médicos, puesto que ya había sanadores indígenas.



Animales empleados en botica. Museo Alemán de Historia de la Farmacia, Heidelberg

Schmitz realiza una minuciosa descripción de la farmacia griega y centroeuropea, pero hay lagunas inexplicables en cuanto se refiere al mundo de la farmacia latina. Sorprende muy especialmente la irrelevancia que se concede a la aportación del mallorquín Ramón Llull. Al polémico Raimundo Lulio se le atribuyeron textos farmacéuticos tan importantes como el *Liber de Quintaessentia,* texto clave en la transición de la polifarmacia vegetal galenista al paracelsismo y en la renovación de la técnica farmacéutica.

Como la mayoría de los historiadores de la farmacia, Schmitz presenta como entidades separadas lo que son variaciones de una misma doctrina terapéutica, basada en el humoralismo. La farmacia grecorromana, que fue iniciada por los griegos y conservada por los romanos y los bizantinos, alcanzó su culminación con los árabes y pasó a los latinos medievales para continuar vigente durante el Renacimiento y no desaparecer por completo hasta el siglo xix con la teoría microbiana y la farmacología experimental de Bernard. No hubo farmacia griega, farmacia romana, farmacia bizantina, farmacia árabe, farmacia medieval latina. La farmacia grecorromana se desarrolló en varios escenarios, culturas e idiomas y los cambios acaecidos no supusieron un cambio de modelo. Esa continuidad hizo posible que el texto de Nicolás Myrepsos, el *Dynameron*, escrito en el siglo xiii, fuera el libro, traducido del griego al latín, en el que estudiaron farmacia los médicos de la facultad de medicina de París hasta 1651.

Las objeciones anteriores no descalifican en modo alguno un texto espléndido, modélico desde muchos puntos de vista, escrito con rigor y muy documentado. Un libro magnífico, al que sólo puede hacérsele el reproche de ser muy tradicional y conservador en la selección de sus materiales y métodos.

Juan Esteva de Sagrera

de la nueva mecánica cuántica en los años veinte. Según el relato al uso, entre finales de 1925 y principios de 1926 emergieron dos grandes teorías de los fenómenos atómicos, la mecánica de matrices y la mecánica de ondas. La mecánica de matrices nació con la reinterpretación realizada por Heisenberg de las magnitudes físicas básicas; de inmediato, Max Born, Pascual Jordan y el propio Heisenberg la generalizaron en una estructura teórica completa y lógicamente consistente a través de una serie de trabajos conocida por *Dreimännerarbeit*. Wolfang Pauli demostró que el formalismo abstracto de la mecánica de matrices aportaba el planteamiento correcto de la teoría atómica al solucionar el problema de la estructura del átomo de hidrógeno. El concepto básico de la teoría de matrices era la partícula, o corpúsculo.

El concepto básico de la teoría rival, la de Erwin Schrödinger (1926), era por contra la onda. La teoría de Schrödinger amasaba herramientas intuitivas y utillaje matemático con nociones físicas familiares. Aunque radicalmente distintas en su hipótesis básicas y en el tratamiento matemático, muy pronto demostró Schrödinger que ambas teorías eran equivalentes. El único problema era el de la interpretación física. Schrödinger intentó adscribir a su teoría una interpretación clásica y ondulatoria continua, pero los físicos de Göttingen y Copenhague adujeron que se trataba de un empeño vano. Por eso la interpretación física que prevaleció fue la indeterminista de Heisenberg, Born y Bohr.

Frente a ese cuadro, propone Beller que la mecánica de matrices no pretendía al principio una ruptura radical. Asediada por las dificultades, ni siquiera sus creadores la consideraron un paso seguro hacia la teoría correcta. Esta fue la razón principal de la aceptación entusiasta de la teoría de Schrödinger.

Tampoco era la mecánica matricial una teoría de los corpúsculos antes de la interpretación probabilística de Born. En la perspectiva matricial, el átomo remitía a una entidad electromagnética, no cinemática. El supuesto radical del planteamiento inicial de la

teoría de matrices —dentro del átomo no hay geometría— evolucionó hacia un postulado más moderado, según el cual en el interior del átomo sólo hay estadística.

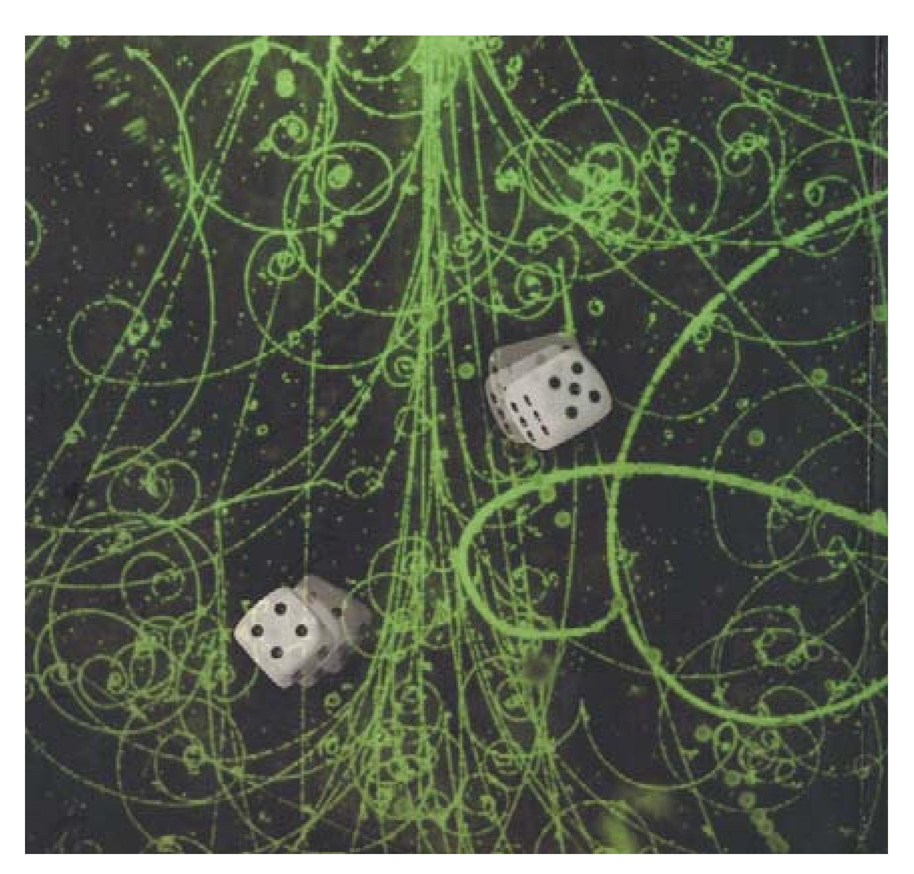
Originalmente, la mecánica matricial y la teoría de Schrödinger tenían más cosas en común de lo que suele reconocerse: ambas consideraban algunos procesos vibratorios como primarios; pero mientras Heisenberg reinterpretaba el espacio-tiempo clásico mediante tales vibraciones, Schrödinger dejaba inalterados los conceptos usuales de espacio-tiempo.

La mecánica de matrices, ideada para evitar los problemas de la vieja teoría cuántica, implicaba un cambio radical en las descripciones del continuum espacio-temporal empleado en anteriores teorías físicas. El escrito fundacional de Heisenberg de 1925 anunciaba el propósito de eliminar los inobservables y prescindir de los modelos visualizables que reposaban en las descripciones espacio-temporales. En vez de variables cinemáticas inobservables como la posición, velocidad y período de revolución del electrón, Heisenberg incorporaba sólo datos espectroscópicos observables en el marco teórico.

El concepto de partícula no era compatible con el enfoque matricial original. Sus proponentes consideraron inobservables las propias posiciones del electrón: sólo podían medirse la frecuencia, intensidad y polarización de la radiación emitida. Con el fin de describir la interacción entre un átomo y la radiación en estrecha analogía con la teoría clásica, sustituyeron el átomo por una serie de osciladores virtuales cuyas frecuencias se correspondían con las frecuencias de transición entre los estados estacionarios del átomo. Sostenían que en cada estado estacionario el átomo emite continuamente ondas virtuales cuyas frecuencias se corresponden con las transiciones posibles de un estado a todos los demás.

Hacia los años treinta, el liderazgo de la física pasó de Alemania a los Estados Unidos. Tras la guerra, la atención se centró en las altas energías. En los años dorados de 1945-65, experimentadores y teóricos pusieron los fundamentos del modelo estándar de las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas de las partículas fundamentales.

Pero quizá sea hora de abordar los conceptos fundamentales. Además del libro citado de Omnès nos valdremos de *The Odd Quantum*. Importa acotar la idea de cuantización. Desde el punto de vista clásico, una partícula puede hallarse a priori en cualquier sitio y tener una cantidad de movimiento (producto de la masa por su velocidad). Por tanto, su momento angular (producto de la velocidad angular por su momento de inercia) podría presentar a priori cualquier valor. Pero el momento angular cuántico sólo puede tomar ciertos valores discretos. Está cuantizado. También a veces la energía se halla cuantizada. Tamaña discretización, inexplicable desde un planteamiento clásico, es lo que aporta el adjetivo "cuántico" en la expresión mecánica cuántica.



Cámara de burbujas, de Tracy Baldwin

La de probabilidad es otra noción que conviene tener machihembrada. Los datos sobre la posición y cantidad de movimiento en cualquier instante constituyen el estado del sistema de partículas clásico. Nos dice cuanto puede conocerse dinámicamente del sistema. Otras magnitudes de interés, tales como la energía, momento angular, etc., se definen mediante las variables de posición y cantidad de movimiento. Por el carácter determinista de la mecánica clásica, el presente, las condiciones iniciales, prefija el futuro. La noción de estado aparece también en mecánica cuántica. Pero existe una profunda diferencia; un estado cuántico no especifica las posiciones y cantidad de movimiento precisas de las partículas; sólo especifica probabilidades. La mecánica cuántica es intrínsecamente probabilista.

Cualquier estado que tenga una distribución de probabilidad muy localizada de las mediciones de la posición presentará una amplia distribución para las mediciones de la cantidad de movimiento, y viceversa. Existe un tope para la capacidad de localizar conjuntamente posición y cantidad de movimiento. Así también ocurre con otros pares de *observables* (magnitudes mensurables). Estamos hablando del principio de indeterminación de Heisenberg. Todo lo que acontece en el mundo cuántico se produce al azar y no existe una causa directa para los fenómenos cuánticos. No hay ninguna causa que provoque que un átomo excitado se desintegre en un momento determinado. Las leyes gobiernan el proceso entero, pero sólo expresan la probabilidad de que el fenómeno ocurra en un tiempo con preferencia a otro.

Una magnitud física (un observable) se expresa matemáticamente por un operador, es decir, por una suerte de ingenio que manipula funciones. La no conmutatividad de los opera-

dores desempeña un papel central en mecánica cuántica. En ello se fundan las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, que nos evitan la atribución simultánea, a una partícula, de una posición bien determinada y una velocidad bien definida. De una forma similar no podemos describir la luz como siendo al mismo tiempo onda electromagnética y compuesta de fotones. La primera contribución importante de Bohr a la interpretación se origina en esas imposibilidades. No puedo hablar de la posición de un átomo o de su velocidad en un instante dado; tengo que escoger. Estas opciones, estas descripciones, son complementarias. Cada una de ellas es correcta en sí misma, sin contradicciones internas, si bien es imposible combinarlas. La imposibilidad de combinar ondas y partículas es el principio de complementariedad.

Treiman presta atención especial a la perspectiva ondulatoria, más fundamental, y a su expresión en teoría cuántica de campos, que resuelve dos problemas fundamentales dejados abiertos por la física clásica y la mecánica cuántica: la identidad de las partículas elementales y la creación (y aniquilación) de materia. ¿Por qué los electrones del universo son absolutamente idénticos? Desde el amanecer de la teoría atómica, se apelaba siempre a su razón de factum: eran así y no había que darle más vueltas. Hasta que la teoría cuántica de campos obtuvo la razón subyacente a ese supuesto. Hoy las partículas se interpretan como rizos en un continuum infinito e invisible, denominado campo.

Por lo que respecta a la creación y aniquilación de materia, cuando dos partículas chocan podría suceder que ambas desaparecieran y aparecieran otras dos. Ningún modelo, ninguna teoría puede dar cuenta de esos acontecimientos, salvo la teoría cuántica de campos. Una descripción matemática consistente de la creación y aniquilación de materia debe saludarse como uno de los logros supremos de la física del siglo XX. Treiman muestra que los campos cuánticos pueden aportar una descripción tal.

Para el concepto, relacionado con lo anterior, de simetría, hemos de abrir *CP Violation*. Las simetrías han desempeñado un papel importante en física. El objeto principal de esta obra son las simetrías discretas: P, paridad (que refleja la coordenada espacial **x** en –**x**); C, conjugación de carga (que transforma una partícula en su antipartícula); transformación combinada CP, y la inversión del tiempo T (que cambia la coordenada temporal t en $-t$).

La violación CP representa la simetría más delicadamente rota observada en la naturaleza. ¿Por qué no se aniquiló la materia del universo con la antimateria inmediatamente después de la creación? El descubrimiento de que las fuerzas débiles rompen simetrías discretas —primero la paridad P y la conjugación de carga C; luego, la CP y T— ha tenido un impacto revolucionario en la interpretación de la naturaleza. De la violación de la CP aprendimos, y no de la P y la C por separado, que la izquierda y la derecha, la carga positiva y negativa son dinámicamente distintas, y no meros rótulos por mor de convención. Además, la naturaleza distingue entre pasado y futuro incluso a nivel microscópico. Si bien la violación CP se ha observado hasta hoy sólo en la desintegración de los mesones K_L, comporta consecuencias de largo alcance; sin ir más lejos, el predominio de la materia sobre la antimateria obedece a causas dinámicas y no refleja las condiciones iniciales.

Del sueño analítico en que había caído la filosofía, reducida a mera historia o lógica, la están despertando nuevos ontólogos, diestros en mecánica cuántica o en genética, según la parcela de la realidad abstraída, conocedores del formalismo implicado. A esa nueva estirpe pertenecen los autores de *The Dappled World*, *From Physics to Philosophy* y *A Philosopher's Understanding of Quantum Mechanics*.

Suele afirmarse que el éxito espectacular de la ciencia contemporánea respalda una descripción del mundo en el marco ordenado de una teoría elegante. Nancy Cartwright sostiene lo contrario; en su opinión, junto a unos aspectos ordenados, otros muestran sólo cierta regularidad y los hay que siguen su propio albur. Los científicos no se guían por leyes universales y principios generales. Antes bien, se les entrena para construir modelos que incorporan supuestos teóricos y pruebas o datos empíricos. Lleva veinte años esta profesora de filosofía de la Escuela

Ingeniería sísmica

DYNAMIC ANALYSIS AND EARTHQUAKE RESISTANT DESIGN, VOLUME 1, STRONG MOTION AND DYNAMIC PROPERTIES, Japanese Society of Civil Engineers. A. A. Balkema; Rotterdam, 1997.

El análisis dinámico constituye el método más refinado y más próximo a la realidad para el diseño sismorresistente de estructuras. Pero, dada su complejidad, suele sustituirse por métodos más simples de análisis estático en el diseño de las estructuras comunes.

Este libro es el primer volumen de una serie preparada por la Asociación Japonesa de Ingenieros Civiles, como resultado de un taller sobre análisis dinámico y sus aplicaciones realizado en 1985, con el objetivo de presentar y evaluar el estado actual de la ingeniería sísmica.

Al tratarse de una traducción, adolece de cierta falta de actualidad que en este caso, por el tema tratado, resulta de importancia. En los últimos diez años la ingeniería sísmica ha experimentado un notable desarrollo, impulsado en parte por el conocimiento suministrado por los terremotos de Loma Prieta en 1988, y Northridge y Kobe en 1994. Las referencias más recientes son de finales de los ochenta, salvo en el apartado dedicado a la simulación de acelerogramas mediante funciones empíricas de Green.

En la primera parte, que trata de conceptos generales de sismología y de peligrosidad sísmica, es donde más se aprecia la falta de actualidad y el carácter local. Por citar algún ejemplo, afirma erróneamente que en Europa se utiliza la escala de intensidad Mercalli Modificada (MM), cuando desde su introducción en 1964 la más común ha sido la MSK (Medvedev-Sponheuer-Kárník); y no menciona la escala de magnitud momento, introducida por Kanamori en 1977, cuyo uso se generaliza cada vez más, ni tampoco la instrumentación digital. Más completa resulta la segunda parte, donde se estudian las propiedades dinámicas del suelo y de los materiales de construcción de estructuras (acero y hormigón), así como los métodos para determinarlas.

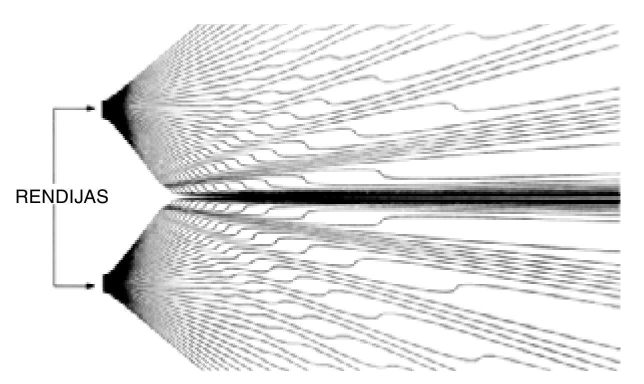
Mariano García Fernández

de Economía de Londres, de militancia empirista, desarrollando una crítica implacable de las formas habituales de pensar sobre la ciencia.

Según la tesis oficial del progreso de la ciencia, la física cuántica ha sustituido a la física clásica, que constituye una aproximación más certera a la realidad. Pero, replica la autora, sabemos que la física cuántica no ha reemplazado en absoluto a la física clásica. Nos servimos de ambas; el que empleemos una u otra depende de la clase de problemas que pretendamos solucionar y del tipo de técnicas que apliquemos. El estudio de las aplicaciones más brillantes de la teoría cuántica nos enseña que la física cuántica funciona sólo en tipos muy específicos de situaciones que se ajustan a los conjuntos de modelos restringidísimos que puede idear; y nunca se desenvuelve con soltura allí donde la física clásica alcanza óptimo rendimiento.

Reduce a tres puntos su doctrina epistemológica. Primero, el éxito empírico de nuestras mejores teorías físicas podría respaldar la verdad de éstas, pero no su universalidad. El caso opuesto es más cierto. En segundo lugar, las leyes, allí donde se aplican, se cumplen sólo *ceteris paribus*. Por "leyes" entiende las descripciones de lo que sucede con regularidad. Y, por fin, nuestro conocimiento científico de mayor alcance no es el conocimiento de las leyes, sino el conocimiento de la naturaleza de las cosas. El hilo conductor que teje su pensamiento es la noción de "mosaico de leyes", que se funda en la observación de que la naturaleza está gobernada en dominios distintos por diferentes sistemas de leyes no necesariamente vinculadas entre sí de una manera sistemática o uniforme.

En particular niega que haya, por un lado, teorías que representen y, por otro, fenómenos representados. Sólo acepta modelos que median entre la teoría y el mundo. Se limita a dos tipos principales, los modelos representativos y los interpretativos. Construimos los primeros con la ayuda de la teoría para simbolizar disposiciones reales y asuntos que acontecen en el mundo. Para las teorías que, como la mecánica cuántica, se diluyen en principios puente, necesitamos los segundos. La física requiere principios puente porque sus términos descriptivos básicos no se aplican directamente al mundo, sino que funcionan como términos abstractos.



Trayectorias reales de las partículas en la teoría de Bohm en el experimento de la doble rendija

En *From Physics to Philosophy* se rinde homenaje a Michael Redhead, inspirador y jefe de filas de la "escuela de Cambridge" de filosofía de la física. Firme partidario de emplear los fundamentos científicos y el formalismo matemático, en particular de la teoría cuántica, para entender la ontología del mundo. Desarrolló el *realismo estructural*, según el cual las estructuras —formalismo, modelos y analogías— de una teoría terminarán por definir las entidades reales, incluidas los inobservables. Vertebró su pensamiento en *Incompleteness, Non Locality, and Realism*, publicado en 1987.

Los ensayos en su honor ofrecen perspectivas filosóficas de la teoría cuántica y la relatividad, con particular detenimiento en el problema de la medición y el empeño realizado en su resolución mediante la atribución de valores adicionales a las magnitudes físicas. A este respecto, Rob Clifton sigue a John Bell en su deseo de elevar algunas *observables* al estatuto de "*beables*" (existibles), para las cuales la probabilidad de que la magnitud presente cierto valor es la probabilidad de observar ese valor. (Los *beables* son partículas puntuales carentes de estructura en mecánica cuántica; en teoría cuántica de campos deben ser campos.)

La naturaleza de estas entidades postuladas por Bell centra buena parte de las reflexiones de la interpretación modal de la mecánica cuántica, expuesta por uno de sus más jóvenes y tenaces sistemáticos en *A Philosopher's Understanding of Quantum Mechanics.* Predica, pues, Pieter Vermaas que la mecánica cuántica puede considerarse una teoría que describe la realidad a través de sistemas físicos que poseen propiedades definidas, es decir, describe la realidad con independencia del observador.

Por un lado la mecánica cuántica da razón, conforme con nuestras observaciones, del comportamiento de la luz y de las partículas elementales. Sus predicciones pueden ponerse en obra; el láser que barre los discos CD funciona según principios de mecánica cuántica. Mas por otro lado, la mecánica cuántica no aporta una descripción plena de la luz y las partículas elementales; en su formulación estándar, asigna un estado mecano-cuántico a un sistema y ese estado sólo adquiere significado a través de los resultados de las mediciones realizadas. Por tanto, la mecánica cuántica ofrece descripciones parciales del comportamiento de la luz y de las partículas elementales. Sin embargo, no se ha conseguido todavía una descripción general de la luz y de las partículas elementales que abarque las descripciones parciales.

Las interpretaciones modales admiten la posibilidad de una descripción general de la luz y de las partículas elementales. Para ello, modifican la formulación estándar al atribuir al estado mecánico-cuántico de un sistema, en todas las ocasiones, un significado de las propiedades poseídas por tal sistema. Con esta modificación, la mecánica cuántica aporta una descripción de la realidad porque ahora los sistemas tienen siempre propiedades, se haya o no realizado medición alguna.

El nuevo enfoque remonta su origen a 1972, cuando Van Fraasen, para interpretar la mecánica cuántica, trasplantó el análisis semántico de la lógica modal al análisis de la lógica cuántica. La interpretación resultante se denominó interpretación modal de la lógica cuántica.

Característica de la interpretación modal es su adhesión a la formulación estándar de la mecánica cuántica. Acepta que la descripción mecánico-cuántica de un sistema está definido en un espacio de Hilbert. Suscribe también que los estados de los sistemas evolucionan en los sistemas modales de acuerdo con la ecuación de Schrödinger. Además, las interpretaciones modales toman la mecánica cuántica como teoría universal de la naturaleza y dan reglas, estocásticas, para adscribir propiedades a los sistemas en todos los tiempos. El estado asignado a un sistema es el estado de un sistema individual, no la descripción de un conjunto de sistemas.

LUIS ALONSO

Les Rosenau

Contadores de electricidad

El contador encerrado en una carcasa de vidrio que pende de una pared de su casa, en el sótano o de un poste cercano al aire libre, registra la energía que fluye a su domicilio procedente de una planta de la compañía de luz. Ese aparato mide la corriente (flujo de electrones, que se expresa en ampère) y el voltaje, o tensión, que impulsa a los electrones por el hilo conductor. Para determinar el consumo, el contador multiplica automáticamente ampère por volt.

UN CONTADOR es, a grandes rasgos, un motor movido por las fuerzas magnéticas creadas por el paso de una corriente eléctrica a través de bobinas. Los conductores de entrada están conectados a una bobina de voltaje; la corriente fluye entonces por la bobina de amperaje hacia el circuito del domicilio. Cuando la corriente atraviesa las dos bobinas, el campo magnético inducido hace que un disco de aluminio gire a una velocidad proporcional a la cantidad de watt consumidos. Sobre ambas caras del disco hay montados imanes permanentes para asegurar la precisión de su movimiento; otro campo magnético mantiene suspendidos en el aire el disco y su eje, eliminando así los rozamientos que pudieran estorbar una lectura correcta.

BOBINA DE VOLTAJE

SISTEMA DE SUSPENSION MAGNETICA

BOBINA DE AMPERAJE

IMAN PERMANENTE

ENGRANAJES

CADA REVOLUCION del disco suele equivaler a 7,2 watt-hora. (Como referencia, una bombilla de 100 watt consume 100 watt-hora de electricidad por hora.) Cuanto más potencia consuma la casa, más rápido gira el disco. Como las compañías de electricidad miden los consumos en grandes unidades, o sea, en kilowatt-hora, cada 138,88 revoluciones del disco indican un consumo eléctrico de 1 kilowatt-hora (1000 watt-hora). Por consiguiente, cada 1000 vueltas del disco indican un consumo de 7,2 kilowatt-hora.

DISCO DE ALUMINIO

REGISTRADOR

UN TREN DE ENGRANAJES transfiere la información sobre el número de revoluciones del disco al conjunto de diales de un registrador; el número de diales depende del tipo de contador. El lector del contador registra la posición del dial de kilowatt-hora y determina el consumo del mes por sustracción de la lectura anterior. La implantación de una nueva técnica permite que los contadores comuniquen las lecturas de kilowatt-hora a una instalación central mediante radioondas, líneas telefónicas o incluso mediante la misma línea de distribución de electricidad.

INVESTIGACION y CIENCIA